

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

Анатолій ОРЛОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності

153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: ”Міська волоконно-оптична телекомунікаційна мережа на основі пасивних оптичних селективних розгалужувачів”

Виконав : студент 2-го курсу, групи ДП-91мн  
(шифр групи)

Федоров Антон Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Домбругов М.Р.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю к.ф.-м.н., с.н.с. Свєчніков Г.С.  
(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц. к.т.н., Діденко Ю.В.  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить основну частину на 77 сторінках, 4 розділи, 28 ілюстрацій, 5 таблиць і 14 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є топологія волоконно-оптичної мережі «УРАН» в м. Одеса.

Предметом дослідження технологія грубого спектрального ущільнення оптичних каналів на різних несучих довжинах хвилі па пасивні оптичні селективні відгалужувачі.

Метою роботи є розробка модернізованої топології волоконно-оптичної лінії зв'язку в сегменті «УРАН» в м. Одеса на пасивних оптичних селективних відгалужувачах.

Розроблено топологію волоконно-оптичної мережі із застосуванням технології CWDM. Нова лінія зв'язку забезпечує безперервне постачання сигналу абонентам в разі проблем з енергопостачанням на вузлах, до яких під'єднані їхні точки присутності. Мережу розгорнуто частково паралельно існуючій одножильній оптичній лінії передачі.

Ключові слова: ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ, СПЕКТРАЛЬНЕ УЩІЛЬНЕННЯ, МУЛЬТИПЛЕКСОР, ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОР, ТРАНСИВЕР, ВІДГАЛУЖУВАЧ, КОМУТАТОР, ДОВЖИНА ХВИЛІ, ТОПОЛОГІЯ.

## ABSTRACT

Thesis contains the main part of 77 pages, 4 sections, 28 illustrations, 5 tables and 14 sources in the list of references.

The object of the study is the topology of the fiber-optic network "URAN" in Odessa.

The subject of research is the coarse wavelength-division multiplexing technology and using passive optical selective couplers. Odessa on passive optical selective splitters.

A fiber-optic network topology has been developed using CWDM technology. The new communication line provides signal supply to subscribers in case of power supply problems at the nodes to which their presence points are connected. The network partially deployed in parallel with the existing single core optical transmission line.

Keywords: fiber-optic communication lines, spectral SEALS, multiplexers, demultiplexers, transceivers, couplers, switches, wavelength topology.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І<br>ТЕРМІНІВ ..... | 5  |
| ВСТУП .....   | 6  |
| 1. Волоконно-оптичні лінії зв'язку .....                                    | 8  |
| 1.1. Галузі застосування і класифікація волоконно-оптичних кабелів .....    | 9  |
| 1.2. Історія ВОЛЗ .....   | 10 |
| 1.3. Переваги та недоліки ВОЛЗ.....   | 15 |
| 1.4. Пасивні оптичні елементи ВОЛЗ .....                                    | 18 |
| 1.4.1. Волоконно-оптичні відгалужувачі та розгладжувачі .....               | 19 |
| 1.4.2. Волоконно-оптичні перемикачі .....                                   | 22 |
| 1.4.3. Технологія MEM.....  | 29 |
| 1.4.4. Оптичні мультиплексори та демультимплексори .....                    | 31 |
| 2. ТЕХНОЛОГІЯ УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ .....                             | 32 |
| 2.1. Використання технології CWDM .....                                     | 35 |
| 2.2. Устаткування CWDM .....  | 38 |
| 2.2.1. SFP-трансивери.....  | 39 |
| 2.2.2. OADM .....   | 41 |
| 2.2.3. Недоліки CWDM .....  | 43 |
| 2.3. Будова мультиплексорів і демультимплексорів .....                      | 44 |
| 2.4. Топологія побудови ВОЛЗ .....  | 47 |
| 3. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ .....   | 51 |
| 3.1. Загальна інформація про мережу УРАН .....                              | 51 |
| 3.2. Волоконно-оптичний сегмент мережі УРАН в Одесі .....                   | 55 |

|  |    |
|--|----|
| 4. МІСЬКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА МЕРЕЖА НА ОСНОВІ ПАСИВНИХ<br>ОПТИЧНИХ СЕЛЕКТИВНИХ РОЗГАЛУЖУВАЧІВ У М. ОДЕСА.....     | 57 |
| 4.1. Аналіз наявної топології мережі та обґрунтування розробки модернізації<br>використанням CWDM.....           | 57 |
| 4.2. Обладнання, необхідне для реалізації проекту.....   | 60 |
| 4.2.1. Оптичний мультиплексор .....  | 61 |
| 4.2.2. SFP-трансивери.....   | 63 |
| 4.2.3. Пасивні відгалужувачі .....   | 65 |
| 4.2.4. Вузлові комутатори .....  | 67 |
| 4.3. Розробка топології мережі «УРАН» в м. Одеса на основі пасивних<br>оптичних селективних розгалужувачів ..... | 69 |
| ВИСНОВКИ .....   | 74 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....   | 75 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку.

ВОК – волоконно-оптичний кабель.

СКС – структурована кабельна система.

ОП – оптичні підсилювачі.

SFP – small form-factor pluggable.

SDH – synchronous digital hierarchy.

CWDM – coarse wavelength-division technology.

MUX – multiplexer.

DEMUX – demultiplexer.

STP – spanning tree protocol.

OADM – optical add-drop multiplexer.

## ВСТУП

Основою оптичних систем доступу (ОСД) є пасивні оптичні мережі (ПОМ або англ. PON). Назва «пасивні» говорить про те, що в своїй структурі ПОС не містить активних електронних і квантово-оптичних пристроїв і елементів: випромінювачів (лазерів і світлодіодів), оптичних підсилювачів, електронних підсилювачів, фотодетекторів, регенераторів і друге частин, що вимагає Підведення електричного живлення (автономного або мережевого). Крім оптичних кабелів, до складу ПОМ входять: оптичні розгалужувачі і відгалужувачі, оптичні мультиплексори / демультимплексори, оптичні фіксовані атенюатори, оптичні фільтри, ізолятори і циркулятори, з'єднувачі і розподільники. Всі перераховані пристрої і елементи мають коефіцієнт передачі менше одиниці.

З кожним роком кількість споживачів послуг широкосмугового доступу неухильно зростає. Удосконалюється елементна база ВОСП і поліпшуються параметри оптичних мереж зв'язку, включаючи і оптичні мережі доступу. Без модернізації ПОС, параметри якої були визначені в ще в 1997 році, сучасна пасивна оптична мережа вже не в змозі задовольняти запити споживачів. Особливо це відноситься до корпоративних абонентів (КА). Одним з параметрів ПОС, який необхідно покращувати, є пропускна здатність на всіх ділянках, включаючи абонентські.

Збільшити пропускну здатність ПОС можна шляхом заміни в центральних оптичних вузлах (ОЦУ) обладнання СЦІ рівнів СТМ-1 і СТМ-4 на апаратуру більш високих ієрархій швидкостей передачі - на СТМ-16 або СТМ-64. Цей шлях є недоцільним через високі додаткові витрати часу і коштів та переривання зв'язку.

Більш доцільним методом підвищення пропускної спроможності ОСД, включаючи ПОС, є застосування спектрального ущільнення, тобто технологій WDM (Wavelength Division Multiplexing). Підвищення пропускної здатності оптичних мереж доступу методом WDM має такі переваги:

- реконструкція діючих вузлів зв'язку проводиться шляхом установки додаткових блоків без переривання зв'язку та обслуговування, а також без демонтажу знаходиться в експлуатації обладнання;
- спрощується проектування нових з'єднувальних ділянок ОСД, в тому числі ПОС на напрямках з прогнозованим зростанням необхідної пропускної спроможності;
- різко знижуються вимоги до параметрів середовища передачі, тобто до параметрів і характеристик оптичного волокна, що вельми важливо, перш за все для абонентських ділянок;
- значно знижуються вимоги до параметрів дискретних пасивних оптичних елементів, які використовуються в ПОС, що також знімає вартість всієї системи.

Розвиток подібних систем став можливим завдяки вдосконаленню технології оптичного волокна, що дозволило збільшити його смугу пропускання на порядок: від 30 до 340 нм. Затухання в смузі пропускання змінювалося поступово в порівняно невеликому діапазоні, що в свою чергу, збільшує крок між несучими довжинами хвилі, щонайменше в 10 разів, і тим самим значно спрощує їх фільтрацію на стороні отримувача, зменшуючи вартість обладнання. З'явився новий клас рішень. Спектральне ущільнення дозволяє дуплексну передачу протоколів різних типів через оптичне волокно. Технологія використовується для більш ефективного застосування існуючої волоконно-оптичної інфраструктури та збільшення пропускної здатності оптичного



волокна. Її використання може зменшити вартість встановлення нового оптичного кабелю, або покращити ефективність вже прокладеного.

## 1. Волоконно-оптичні лінії зв'язку

Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) - це вид системи передачі, в якій інформація передається по діелектричних оптичним волокнам, тобто оптичним хвилеводам, які виготовляються з діелектриків. Це інформаційна мережа, сполучними елементами між вузлами якої є оптичні лінії передачі.

Технології ВОЛЗ охоплюють питання, які стосуються електронного передавального обладнання, його стандартизації, протоколів передачі, топології мережі та їх побудови.

В основному ВОЛЗ використовуються при побудові об'єктів, в яких монтаж структурованої кабельної системи (СКС) повинен об'єднати багатопверховий будинок, або в будівлі великої протяжності, а також при об'єднанні територіально-розрізнених об'єктів [1].



Рис. 1.1. Структурна схема ВОЛЗ, яка застосовується для створення підсистеми зовнішніх магістралей.

### 1.1. Галузі застосування і класифікація волоконно-оптичних кабелів.

Оптоволоконні системи є надзвичайно валим винаходом людства. Передача інформації може бути здійснена практично у будь-яку точку світу. Волоконно-оптичний кабель виступає в ролі провідника, який за допомогою світлового імпульсу доставляє дані. Такий вид лінії використовується виключно для зв'язку. Об'єкт складається з ізольованого тонкого скловолокна. Саме склофібро обумовлює протяжність транспортування світла. В одній схемі може бути кілька видів оптоволоконних кабелів.

Оптичні структури бувають двох видів:

- Одномодовий оптичний волоконний кабель. Його головною відмінністю є наявність у ньому лише одного променя світла, а для передачі його всередині лінії використовується лазерний приймальний датчик.
- Багатомодовий. Цей пристрій можуть транспортуватися відразу кілька променів світла. А передавачі в ньому розташовані світлодіодні. Якість даного гірше, ніж першого, що компенсується ціною подібного роду засобів.

При виборі такої продукції важливу роль відіграє виробник і наявність різних видів кабелів в одному місці.

Класифікація таких провідників визначається характеристиками волоконно-оптичних кабелів:

- Внутрішній монтаж. Виділяють розподільні системи і абонентські. Перші утворюють мережу другі використовують для підключення інтернету клієнту.

- Підвісне монтування (системи відеоспостереження, телефонний зв'язок).
- За умов зовнішньої установки використовують броньований варіант шнура, де метал надійно захищає скляний сердечник від несприятливих зовнішніх умов. Має високі характеристики.
- При закладці в ґрунт використовують броньований кабель волоконно-оптичного кабелю (з дроту або з стрічкової захистом).
- Підвісна (з тросом або без нього). Використовуються для проведення кабелю повітрям. Провід із тросом є самонесучим.
- Монтування під водою. Оптиковолокonnі кабелі цього типу мають певну специфіку укладання і збірки, і тому для такого обладнання в першу чергу необхідна наявність захисту, що залежить від обставин і території встановлення.

У сучасному суспільстві інформація, способи і період часу для її отримання є дуже значущими показниками. З цієї причини багато компаній із надання послуг, пов'язаних з установкою та обладнанням інтернет мережі, намагаються переходити на оптико-волоконну систему, забезпечуючи застосування нових технологій [1].

## 1.2. Історія ВОЛЗ

Кількість інформації у всесвітній мережі постійно зростає. Мережі, у яких використовуються мідні провідники, вже не можуть повністю задовільнити потреби користувачів. На зміну їм прийшли мережі на основі оптичних волокон.

Спочатку концепція передачі світлового потоку була розроблена Деніелем Колладоном (Daniel Colladon) у 40-х роках XIX століття.

Він продемонстрував дослід зі світлом, що поширюється через «параболічний рідкий потік» (елементарний струмінь води). На рисунку зображений загальний вигляд досліду Д. Колладона: з посудини з одного боку виливається струмінь води, а з іншого боку – цей струмінь підсвічується променем світла, що сфокусований лінзою від електричної лампи. В результаті струмінь води, що виливається з посудини, світиться по усій своїй довжині за рахунок повного внутрішнього відбивання світлового променя.



Рис. 1.2. Загальний вигляд досліду Д. Колладона

1934 року Норман Френч (Norman French) запропонував модулювати голос світлом і передавати його стержнями з чистого скла. Реалізація цього проекту в 1930-х не відбулася через неможливість створити у ті часи надчистий матеріал та потрібне джерело світла.

Розробка самого оптоволокна почалася дещо пізніше. 1954 року фізики Наріндер Сингх Капані (Narinder Singh Kapany) та Гарольд Г. Хопкінс (Harold Horace Hopkins) з Англії і Абрахам Ван Хіл (Abraham van Heel) з Голландії одночасно оголосили про створення оптично-волоконного кабелю. В основі

волоконно-оптичного зв'язку було покладене явище повного внутрішнього відображення електромагнітних хвиль на межі розділу діелектриків з різними показниками заломлення.

Принципово стало зрозумілим, що оптичне волокно має складатися з двох елементів – серцевини, що є безпосереднім світлопровідником, і оболонки. Показник заломлення серцевини дещо більший за показник заломлення оболонки, завдяки чому промінь світла поширюється в серцевині, не покидаючи її. Оптичне волокно було тоді не зовсім якісним і мало великі втрати світла, тому розробки щодо його вдосконалення продовжилися. Саме Н.С. Капані першим запропонував 1956 року ввести назву «оптичне волокно». Тоді ж А.В. Хіл виявив, що покриття волокна/скла/пластика прозорою оболонкою значно зменшує втрати світла і різні наведення.

Надалі зусилля інженерів і дослідників були зосереджені на поліпшенні характеристик оптичного волокна. У кінці 1950-х років Лоуренс Кертіс поліпшив конструкцію оптичного кабелю, обробивши його зсередини скловолоконною оболонкою.

Наступною великою подією, яка послужила початком розвитку волоконно-оптичних ліній зв'язку, стало винайдення лазера в другій половині 20-го століття. 1962 року був виготовлений перший прототип напівпровідникового лазера (які й використовуються в лініях оптичного зв'язку). Передавач був виготовлений, проте середовище передачі ще було відсутнє. Того ж року вийшла стаття Чарльза Као, де він запропонував використати скловолокно (оптичне волокно) для передачі сигналу і позначив мінімальні вимоги до загасання (на той момент це було 20 dB/km).

1966 року Ч. Као і Хокам представили оптичні волокна зі звичайного скла, які мали загасання в 1000 дБ/км (для порівняння: загасання в коаксіальному кабелі складало всього 5-10 дБ/км) через домішки, що в них містилися. Співробітник британської компанії Standard Telecommunication Laboratories (STL), китаєць за походженням Чарльз Као (народився в 1933 році в Шанхаї) взявся досліджувати питання загасання сигналу в оптоволокну. Зібравши всі можливі зразки матеріалів для виготовлення волокна, він прийшов до важливого висновку, що загасання залежить тільки від ступеня чистоти самого скла. Саме за ці дослідження Ч. Као 2009 року отримав Нобелівську премію з фізики.

Не минуло і 10 років, як фахівці лабораторії Corning отримали скловолокно із загасанням менше 20 дБ/км за довжини хвилі 633 нм, яке задовольняло необхідні умови, запропоновані Чарльзом Као. Зауважимо, що зараз такі величини здаються несумісними з передачею даних, однак тоді вони здавалися прийнятними для організації зв'язку по волокну. Після прориву у виробництві оптоволокна відразу ж з'явилися (на той момент в лабораторних умовах) напівпровідникові лазери, здатні працювати за кімнатної температури.

Після інтенсивних досліджень у період з 1975 по 1980 рік з'явилася перша комерційна волоконно-оптична система, що оперувала світлом з довжиною хвилі 0,8 мкм і використовувала напівпровідниковий лазер на основі арсеніду галію (GaAs). Бітрейт систем першого покоління складав 45 Мбіт/с, відстань між повторювачами – 10 км.

22 квітня 1977 року в Лонг-біч, штат Каліфорнія, компанія General Telephone and Electronics уперше використала оптичний канал для передачі телефонного трафіку на швидкості 6 Мбіт/с.

Друге покоління волоконно-оптичних систем було розроблене для комерційного використання на початку 1980-х. Вони оперували світлом з

довжиною хвилі 1,3 мкм від InGaAsP- лазерів. Проте такі системи все ще були обмежені через розсіювання, що виникало в каналі. Проте вже у 1987 році ці системи працювали на швидкості до 1,7 Гбіт/с за відстані між повторювачами в 50 км.

Прокладання першої у світі трансокеанської волоконно-оптичної лінії зв'язку було завершено в 1988 році (між Японією і США), її довжина склала близько 10 тисяч кілометрів. Перший трансатлантичний телефонний оптичний кабель (ТАТ - 8) був введений в експлуатацію також в 1988 році. У його основі лежала оптимізована Е. Дезюрвіром (E.Desurvire) технологія лазерного посилення. ТАТ - 8 розроблявся як перший підводний волоконно-оптичний кабель між Сполученими Штатами і Європою.

Розробка систем хвильового мультиплексування (технологія, що дозволяє одночасно передавати декілька інформаційних каналів по одному оптичному волокну на різних частотах) дала можливість у декілька разів збільшити швидкість передачі даних по одному волокну. Таким чином, до 2003 року завдяки застосуванню технології спектрального ущільнення було досягнуто швидкості передачі в 10,92 Тбіт/с (273 оптичні канали по 40 Гбіт/с). У 2009 році лабораторії Белла за допомогою мультиплексування 155 каналів по 100 Гбіт/с вдалося передати дані із швидкістю 15,5 Тбіт/с на відстань 7000 км.

Дослідники з Саутгемптонського університету (Англія) змогли передати 73.7 Тбіт/с майже зі швидкістю світла у вакуумі за допомогою створеного ними оптоволокна із порожнистою серцевиною.

Завдяки використанню ефекту фотонних заборонених зон, їм вдалося надійно «замкнути» світло всередині волокна, досягнувши небаченого раніше для

порожнистих волокон поєднання рівня загасання сигналу (3.5 дБ/км), смуги пропускання (160 нм) і можливості спектрального ущільнення каналів (37 40-гігабітних каналів на одне волокно). Швидкість поширення сигналу склала 99.7% швидкості світла у вакуумі, або майже у півтора рази більше, ніж у звичайному оптоволокні [2].

### 1.3. Переваги та недоліки ВОЛЗ

Волоконно-оптичні лінії володіють переліком переваг перед дротяними (мідними) і радіорелейними системами зв'язку:

- Широка смуга пропускання пов'язана з надзвичайно високою несучою частотою  $10^{14}$  Гц. Це дає потенціал для єдиного оптичного волокна для передачі інформації в декількох терабітах за секунду. Це одна з найважливіших переваг оптичного волокна над міддю або будь-яким іншим носієм передачі інформації.
- Низьке ослаблення світлового сигналу у волокні. В даний час промислові оптичні волокна, вітчизняних та закордонних виробників, мають загасання 0,2-0,3 дБ на довжині хвилі 1550 нм на кілометр. Мале затухання і мала дисперсія дозволяють будувати секції ліній без ретрансляції довжиною до 100 км і більше.
- Низький рівень шуму у волоконно-оптичному кабелі дозволяє збільшити пропускну здатність, передаючи різну модуляцію сигналів з низькою швидкістю кодування.
- Високий шумовий імунітет. Оскільки волокно виготовляють з діелектричного матеріалу, воно є стійким до електромагнітних перешкод



від оточуючих кабельних систем та електричного обладнання, що здатне викликати електромагнітне випромінювання (лінії електропередачі, електродвигуни тощо).

- Легка вага та об'єм. ВОК мають менше ваги та об'єму в порівнянні з мідними кабелями з точки зору однакової пропускної здатності. Наприклад, 900-парний телефонний кабель діаметром 7,5 см еквівалентний оптоволокну діаметром 0,1 см. В захисті і у сталевій стрічковій броні, діаметр такого ВОК становитиме 1,5 см, що в кілька разів менше, ніж телефонний кабель.
- Висока безпека від зовнішнього втручання. Оскільки ВОК практично не випромінюють на радіочастотах, передану по ним інформацію важко перехоплювати, не порушуючи прийом-передачу. Системи безперервного контролю цілісності оптичної лінії зв'язку, що використовують властивості високої чутливості до волокна, можуть миттєво відключати "зламаний" канал зв'язку і подавати відповідний сигнал, попереджаючи систему. Сенсорні системи, що використовують інтерференційні ефекти поширюваних світлових сигналів, мають дуже високу чутливість до коливань та до малих падінь тиску. Такі системи необхідні для створення ліній зв'язку у державних, банківських та деяких інших службах, яким необхідний захист інформації
- Гальванічна ізоляція елементів мережі. Дана перевага оптичного волокна полягає в його ізолюючій властивості. Волокно допомагає уникнути електричних «земельних» петлів, які можуть виникати, коли два мережевих пристрої неізолюваної обчислювальної мережі, пов'язані мідним кабелем, мають заземлення в різних точках будівлі, наприклад на різних поверхах. При цьому може виникнути велика різниця потенціалів,

що здатна пошкодити мережеве обладнання. Для оптоволокуна волокна цієї проблеми просто немає.

- **Вибух та пожежна безпека.** Оптичне волокно практично завжди не може утворити іскру чи нагріти навколишнє середовище, створивши пожежу. Тому мережі ВОК є актуальним засобом доставки інформації на хімічних, нафтопереробних заводах та у підтримці технологічних процесів високого ризику.
- **Економічне питання.** Волокно виготовляється з кварцу, основою якого є кремнезем, який широко поширений і, отже, є недорогим матеріалом, на відміну від міді. В даний час вартість волокна відносно мідної пари відноситься як 2:5. У цьому випадку ВОК дозволяє передавати сигнали на значно більші відстані без ретрансляції, що робить його більш ефективним на великих дистанціях. Число ретрансляторів на довгих лініях скорочується. Використовуючи солітонні системи передачі, відстані у 4000 км були досягнуті без регенерації при швидкості передачі понад 10 Гбіт/с.
- **Тривалий термін служби.** З часом волокна деградують. Це означає, що ослаблення в м'якому кабелі поступово збільшується. Однак, завдяки вдосконаленню технологій виробництва оптичного волокна, що розвиваються, цей процес значно сповільниться, а термін служби становитиме приблизно 25 років. За цей час декілька поколінь/стандартів приймально-передавальних систем можуть бути змінені.
- **Віддалений блок живлення.** У деяких випадках потрібен віддалений блок живлення вузла інформаційної мережі. Оптичне волокно не здатне виконувати функції кабелю живлення. Проте в цих випадках можна

використовувати змішаний кабель, коли поряд з оптичними волокнами проходить кабель обладнаний мідним провідником.

Будь якій концент неодмінно матиме й недоліки. В данному випадку їх перелік менш численний:

- Відносна крихкість оптичного волокна. При сильному вигинанні кабелю (особливо, коли в якості силового елемента використовується склопластиковий прут) можлива поломка волокон або їх замутнення через виникнення мікротріщин.
- Складність з'єднання у випадку розриву.
- Складна технологія виготовлення як самого волокна, так і компонентів ВОЛЗ.
- Складність перетворення сигналу в інтерфейсному устаткуванні.
- Відносно висока ціна у кінцевому рахунку. Проте, подібні системи є дорогими в абсолютних цифрах. Співвідношення ціни і пропускної здатності для ВОЛЗ є більш вигідним, ніж для інших систем.
- Втрата прозорості волокна з часом, внаслідок старіння [3].

#### 1.4. Пасивні оптичні елементи ВОЛЗ

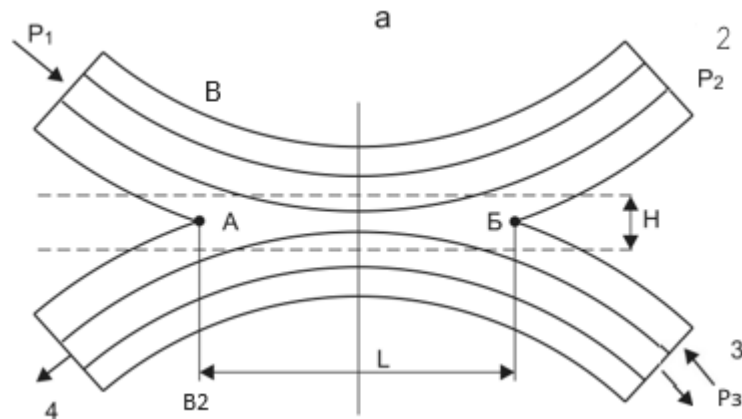
В обладнанні для ВОСП, у вимірювальній техніці для метрологічного забезпечення, в оптичних мережах доступу широко використовуються пасивні оптичні дискретні елементи і пристрої. Пасивні ділянки оптичних мереж доступу - ПОС повністю засновані на використанні таких елементів і пристроїв

. Під пасивними дискретними оптичними пристроями або елементами слід розуміти такі елементи або пристрої, коефіцієнт передачі яких менше одиниці і вони для виконання своїх функцій не вимагають підведення електричного живлення. До пасивних дискретних оптичних пристроїв відносять: оптичні відгалужувачі та розгалужувачі, оптичні перемикачі і комутатори, оптичні ізолятори і циркулятори, поляризатори, коліматори, оптичні мультиплексори / демультиплексори, оптичні модулятори, оптичні з'єднувачі, адаптери та атенюатори і ряд інших пристроїв.

#### 1.4.1. Волоконно-оптичні відгалужувачі та розгалужувачі

Волоконно-оптичні відгалужувачі і особливо разветвители, поряд з оптичними кабелями, є основними елементами пасивних оптичних мереж доступу (ПОМ), які отримують все більше застосування. Це головний елемент деревовидної топології ПОМ (точка - багато точок). Відгалужувачі здебільшого застосовуються в системах і пристроях контролю параметрів і управління обладнанням і систем ВОСП, а також у вимірювальних приладах для ВОСП, особливо в оптичних рефлектометрах. Відповідно до назви, оптичні відгалужувачі виконують функцію відгалуження частини енергії світлового потоку з заданим коефіцієнтом відгалуження. У хвильовідній техніці (а оптичне волокно - це хвилевід оптичного діапазону) відгалужувачі називаються направліннями, тому що відгалуження відбувається тільки при поширенні оптичного випромінювання в прямому напрямку. При поширенні випромінювання в зворотному напрямку відгалуження не відбувається, хоча при цьому в точці відгалуження частина енергії втрачається. В даний час існує два типи спрямованих відгалужувачів: ответвители Х-типу і У-типу. Широке застосування отримали відгалужувачі Х-типу. На рис. 2 представлена схема такого спрямованого відгалужувача.

Відгалужувач Х-типу виготовляється з двох відрізків оптичних волокон. На деякій довжині  $L$  у кожного з волокон сошліфовується частина робочої оболонки (або віддаляється травленням), після чого обидва волокна сплавляються за допомогою зварювального апарату. В результаті такої технологічної операції сердечники волокон розташовуються паралельно на довжині  $L$ . В залежності від відстані  $H$  між центрами сердечників ОВ і довжини  $L$  між хвильоводами відбувається взаємодія, що виражається в тому, що на певній відстані від точки А в напрямку точки Б енергія мод хвильоводу В1 переходить в хвильовід В2, при подальшому поширенні вона повертається в хвильовід В1. На деякій проміжній



2

Рис. 1.3. Спрямований відгалуджувач Х-типу

довжині  $L$  потужність випромінювання розподіляється порівну в обох каналах. Величина  $L$  залежить від зазору  $H$  і від довжини хвилі випромінювання. Найбільш часто відгалужувач типу Х виконується для цього останнього випадку, тобто для режиму поділу вхідної потужності на дві рівні частини, хоча для пристроїв контролю виготовляють і такі Х-відгалужувачі, у яких коефіцієнт відгалуження може становити менше 10а.

Обидва типи відгалужувачів характеризуються такими параметрами:

коефіцієнт передачі:

$$k_{12} = P_2/P_1 \text{ или } k_{12} = 10\lg(P_2/P_1)\text{дБ}; k_{12} \cong k_{21}$$

коефіцієнт розв'язки (ізоляції),

$$k_{13} = P_3/P_1 \text{ или } k_{12} = 10\lg(P_2/P_1)\text{дБ}; k_{13} \cong k_{31}$$

або перехідне затухання:

$$k_{23} = k_{32} = 10\lg(P_{21}/P_{31});$$

Цей параметр визначає ту частину енергії, яка проникає, наприклад, в плече 3 при введенні випромінювання в плече 2 або навпаки - в плече 2 при введенні енергії в плече 3. При цих вимірах торець загального плеча (каналу 1) повинен міститися в кювет з іммерсійної рідиною з показником заломлення, рівним показнику заломлення сердечника ОВ. Ця операція необхідна для виключення внутрішнього відбиття світла від торця при введенні його в одне з бічних плечей. У випадку з Х-відгалужувачі також надходять і з плечем 4. Часто в якості іммерсійної рідини використовується звичайний зневоднений гліцерин, показник

заломлення якого  $n_2 = 1.478$ , хоча для цих цілей створені спеціальні гелі.

Третій параметр - коефіцієнт втрат, що вносяться  $k_{12}$ :

$$k_{\text{вт}} = \frac{P_1 - (P_2 + P_3)}{P_1}$$

або

$$k_{\text{вт}} = 10\lg \frac{P_1 - (P_2 + P_3)}{P_1}.$$

Для Х-розгалужувача при вимірюванні цього параметра вхід 4 також міститься в іммерсійну середу.

#### 1.4.2. Волоконно-оптичні перемикачі

Зміна архітектури волоконно-оптичних мереж, оперативна маршрутизація в мережах доступу і локальних системах ВОСП неможливі без швидкої і ефективної комутації оптичних інформаційних потоків. Ця комутація здійснюється за допомогою волоконно-оптичних перемикачів. Існує досить велика кількість типів волоконно-оптичних перемикачів: електромеханічні, термооптичних, акустооптичні, електрооптичні і перемикачі з керуванням оптичним же сигналом, засновані на нелінійних явищах. Останній тип перемикачів буде розглянуто в наступному розділі.

Принцип дії електромеханічних волоконних перемикачів аналогічний роботі звичайних електромагнітних реле: на нерухомій частини реле під деяким кутом розташовані два торця оптичних волокон. Навпаки

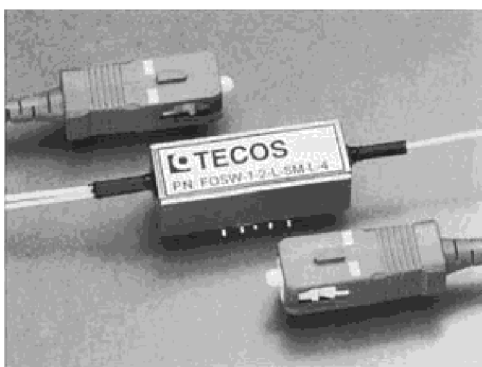


Рис. 1.4. Промисловий зразок електромеханічного волоконно-оптичного комутатора

Торця одного з них на рухомій частини реле закріплений кінець рухомого ОВ торцем, розташованим співвісно з згаданим вище нерухомим ОВ. Взагалі існує велика різноманітність електромеханічних перемикачів оптичних волокон, які в даній роботі розглянути немає можливості. З точки зору втрат ці перемикачі мають не- погані параметри: коефіцієнт передачі  $\Phi$ , 3 ... 1,5 дБ, розв'язка 360 дБ, мала споживана потужність - 2 ... 20 мВт. Недолік таких перемикачів - низька швидкодія, чутливість до зовнішніх впливів, особливо до вібрацій, відносно великі габарити і неможливість застосування в інтегрально-оптичних пристроях. Проте цей тип волоконно-оптичних перемикачів знаходить досить широке застосування. На рис. 8 представлений промисловий зразок електромеханічного оптичного комутатора.

Дедалі більшого поширення набувають термооптичні, акустооптичні і електрооптичні перемикачі.



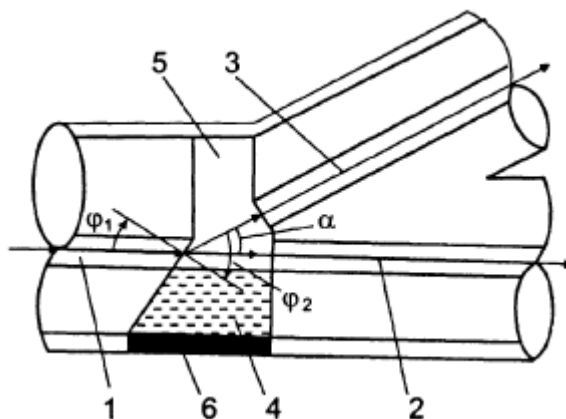


Рис.1.5. Схема термооптичного перемикача

Дія термооптичних перемикачів заснована на декількох принципах роботи. На рис. 4 представлена схема такого перемикача.

Він складається з наступних елементів. Світловід 1, який є загальним каналом, має, як правило, сердцевину і оболонку і розташований співвісно з світловодом 2. Площина вихідного торця світловода 1 нахилена до осі під кутом  $(\psi - \pi) / 2 - \phi$ , площину вхідного торця світловода 2 нормальна до його осі. Поруч зі світловодом 2 розташований світловід 3. Його вісь нахилена до осі світловодів 1 і 2 під деяким кутом  $\alpha$ . Як і для світловода 2, вхідний торець світловода 3 плоский і нормальний до осі. Зі схеми видно, що вихідний торець світловода 1 розташований на деякій відстані від вхідних торців світловодів 2 і 3 і утворює проміжок. Нижня частина проміжку заповнена имерсійної рідиною 4, показник заломлення якої підбирається рівним показнику заломлення сердечника ОВ –  $n_1$ . Кількість рідини повинно бути таким, щоб її поверхня була нижче сердеччини світловодів. Що залишився проміжок заповнений стисненим повітрям з тиском  $1, 1 \dots 1,2$  атм. Принцип дії комутатора полягає в наступному. Випромінювання, проходячи через сердечник

світловода 1 і заломлюючись на його вихідному торці під кутом  $\varphi_2$  "падає нормально на вхідний торець світловода 3 і з урахуванням відображення при нормальному падінні ( $\sim 4\%$ ) вводиться в нього і, розповсюджені по світоводу 3, виходить з

його вихідного торця. При нагріванні рідина 4 розширюється і, якщо температура нагріву достатня, заповнює проміжок між вихідним торцем світловода 1 і вхідним торцем світловода 2. Оскільки показник заломлення рідини приблизно дорівнює показнику заломлення сердечників світловодів 1 і 2, середа уздовж всієї осі стає оптично однорідною і потік, введений в світловод 1, виходячи з його вихідного торця, що не заломлюється і проходить через світло вод 2. Після зняття нагріву стиснене повітря виштовхує рідину в колишнє з-стояння і світловий потік відхиляється в початкове положення. Відзначимо, що при розмірах світловодів, прийнятих в техніці волоконно-оптичного зв'язку.

Тобто при зовнішньому діаметрі  $d_2 = 125$  мкм і діаметрі сердцевини 10 ... 50 мкм, величина проміжку дорівнює одному діаметру сердечника. При таких розмірах проміжку неминуче дію капілярного ефекту, в результаті якого простір між сердечниками може заповнитися рідиною. Надмірний тиск повітря в іншому просторі проміжку сприяє вирішенню двох завдань усунення капілярного ефекту і прискоренню витіснення рідини 4 в початкове положення після припинення нагрівання, себто підвищення швидкодії комутатора. Для оцінки швидкодії і необхідної енергії комутуючі ного теплового впливу були використані дані, наведені роботі. Згідно з цими даними, для крапель рідини діаметром 10 ... 15 мкм доста точно поглинається енергії порядку 10,1 ... 10,4 мкДж, щоб довести їх до випаровування

за час 0,0243 ... 0,11 мкс. У нашому випадку обсяг рідини 4 має порівнянну з цими краплями величину. Відзначимо, що для досягнення працездатності описаного комутатора немає необхідності доводити рідину до випаровування. Щоб рідина від початкового рівня збільшила свій обсяг до верхнього рівня, що перекриває зазор між сердечниками світловодів 1 і 2, досить підвищити її температуру до 50 ... 70 ° С. Час для цього підвищення не перевищить 50 ... 100 нс при енергії теплових імпульсів не більше 10 мкДж.

В роботі розглянуто інший варіант термооптичних волоконного перемикача. На рис. 8.9 представлена схема пристрою такого комутатора, де він виконаний з трьох різних оптичних волокон з однаковими геометричними параметрами.

За типом він відповідає У-електрошини, у якого загальна плече 1 виконано зі звичайного кварцового волокна, що складається з сердечника з показником заломлення  $n_1$ , і оболонки з показником заломлення причому,  $n_1 > n_2$  Торець цього волокна в області з'єднання з волокном верхнього 2 і нижнього бокового плеча 3 сошліфовать, як показано на кресленні, з двох сторін у вигляді гострокутного «даху» з кутом при вершині  $\varphi$ . Торці волокон 2 і 3 зішліфовано під кутом кожне з одного боку і зістиковано з гострокутним торцем волокна загального плеча 1, наприклад, методом спікання (див. рис. 10). При температурі, обраної в якості вихідної, показник заломлення  $n_1 < n_3 = n_2$  і  $n_1 = n_4$ . Однак температурні коефіцієнти збільшення поки зателей заломлення повинні бути в співвідношеннях  $\beta_3 < \beta_4$   $\beta_1 < \beta_4$ . а температурний коефіцієнт збільшення

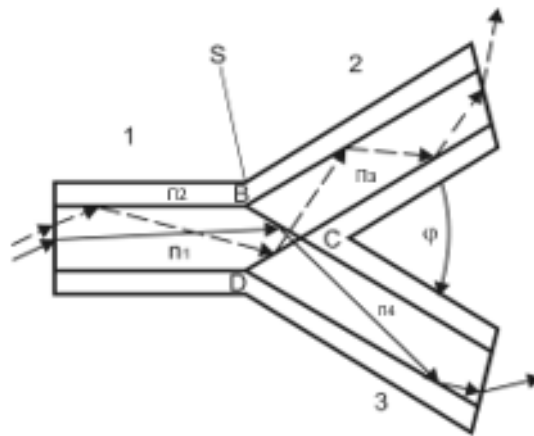


Рис. 1.6. Термооптичний волоконно-оптичний перемикач

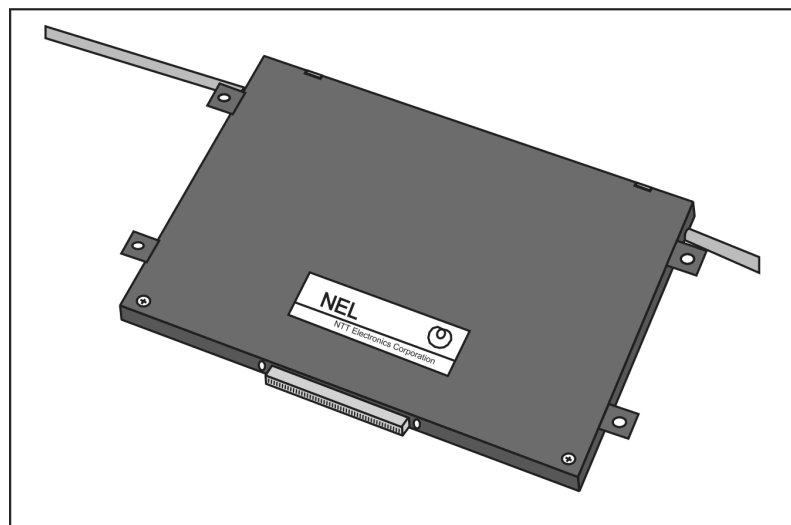
показника заломлення  $n_4$  повинен при цьому має бути від'ємним знак. Таким чином, при підвищенні температури пристрою показник заломлення  $n_3$  повинен зростати швидше, ніж  $n_2$  а показник заломлення  $n_4$  повинен при цьому зменшуватися. При підвищенні температури  $n$  завжди повинен бути менше, ніж

Принцип роботи комутатора полягає в наступному. У початковому стані при дотриманні зазначених вище умов випромінювання, введене у вхідній торець волокна 1 при досягненні його скошеного подвійно торця, зазнає повне внутрішнє віддзеркалення від межі BC і направляється в волокно 3, як показано на малюнку. При деякій температурі рівність  $n_1 = n_4$  порушується і перетворюється в нерівність  $n_1 > n_4$ . а нерівність  $n_1 > n_3$ , навпаки, стає рівністю -  $n = n_0$  • тоді випромінювання (на схемі показано пунктиром) зазнає повне внутрішнє віддзеркалення від межі D і направляється у волокно 2.

В даний час широкого поширення набули термооптичних комутатори на основі інтерферометрів Маха-Цендера, одне з плечей якого виконано з термочутливого

оптичного матеріалу. Внаслідок зміни показника заломлення в цьому плечі створюється зсув фази оптичного випромінювання, що приводить до відхилення випромінювання від вихідного стану в іншому напрямку. На рис. 11 показаний загальний вигляд серійного термооптичних матричного комутатора  $8 \times 8$  напрямків.

Такі комутатори виробляє фірма NEL (Японія). Комутатор має наступні технічні характеристики: робочий діапазон довжин хвиль - 1530 ... 1570 нм, що вносяться втрати (для восьми напрямків) 38 дБ, ізоляція між каналами 345 дБ, швидкодія 33 мс, напруга живлення нагрівального елемента



+5 В, розміри комутатора разом з корпусом - 145 • 100 • 20 мм.

Рис. 1.7. Загальний вигляд термооптичного перемикача фірми NEL

Найбільшого поширення в системах ВОЛЗ, в локальних мережах і т. Д.

Отримують волоконно-оптичні комутатори, робота яких заснована на використанні електрооптичних і акустичних явищ.

Існують електрооптичні матеріали, наприклад, нібат літію  $\text{LiNbO}_3$ ;  $\text{Ti} + \text{LiNbO}_3$ ;  $\text{LiTiO}_3$ ;  $\text{LiTaO}_3$  і ін., Які перетворюються в оптично анізотропні при додатку до

них електричного поля. Анізотропія настає внаслідок зміни показника заломлення матеріалу під впливом електричного поля. В принципі дію таких електрооптичних комутаторів аналогічно роботі термооптичних комутаторів. На рис. 12 представлена схема електрооптичного комутатора на основі спрямованого відгалужувачі Х-типу [3].

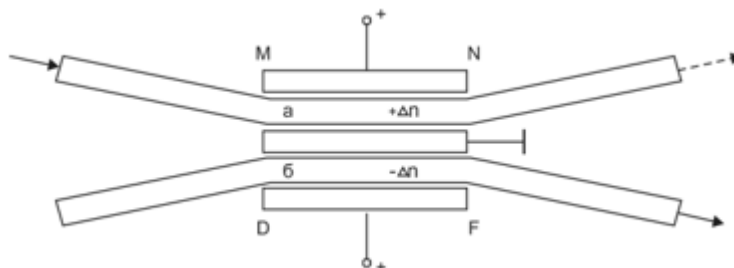


Рис. 1.8. Схема електрооптичного комутатора на основі Х-розгалужувача

#### 1.4.3. ТЕХНОЛОГІЯ МЕМ

В останні 2-3 роки в оптичних крос-коммутаторах оптичних мереж почалося широке використання електромеханічних дзеркальних мікрокоммутаторів на основі технологій мікроелектромеханічних перемикачів світлових потоків. Основною деталлю цих перемикачів є мікродзеркал діаметром 0,5 мм. Це мікродзеркал закріплено на двокоординатному вузлі, що представляє собою дві карданні підвіски. Ці підвіски виконані у вигляді смужок зі спеціального сплаву. При протіканні електричного струму ці смужки збільшуються по довжині (або скорочуються), повертаючи при цьому дзеркало в одному чи іншому напрямку. На рис. 8 представлений варіант такої підвіски круглого мікродзеркала.

На рис. 1.9 представлено пристрій Мікроелектромеханічні оптичного комутатора.

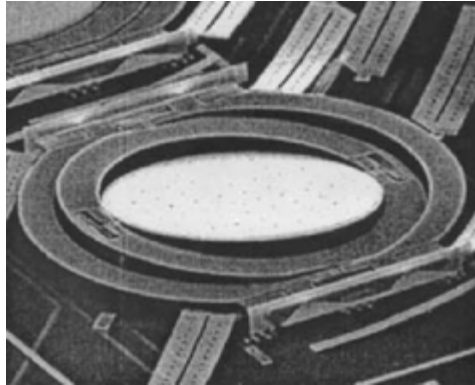


Рис. 1.9. Варіант круглої підвіски карданного мікродзеркала

Комутатор представляє собою масив з 256 мікродзеркал. Діаметр цих дзеркал 0,5 мм, відстань між дзеркалами 1 мм. Навпаки центру кожного з дзеркал розташовані торці 256 волокон з торцевими мікролінзами. Випромінювання, що виходить з торців одного з волокон (Рис. 1.9), подається на відповідне мікродзеркало. Якщо це дзеркало нахилене щодо осі волокна, що відбивається від нього світло направляється на загальний відбивач, який також нахилений під певним кутом. Від цього відбивача світло направляється на інше мікродзеркало, яке спрямовує промінь на торець іншого волокна. Так здійснюється сканування променів по 256 напрямках.

Оптичні комутатори МЕМ мають наступні параметри: вносяться втрати менш 1 дБ, час перемикання - одиниці мілісекунд . Управління проводиться електричними сигналами: напруга 3,5 В при струмі до 25-30 мА.

Таким чином, оптичні комутатори МЕМ, комутуючі сигнальні оптичні потоки по відношенню до цих потоків, є повністю оптичними, але управляються

електричними сигналами, тобто не можуть вважатися повністю оптичними в усіх відношеннях [3].

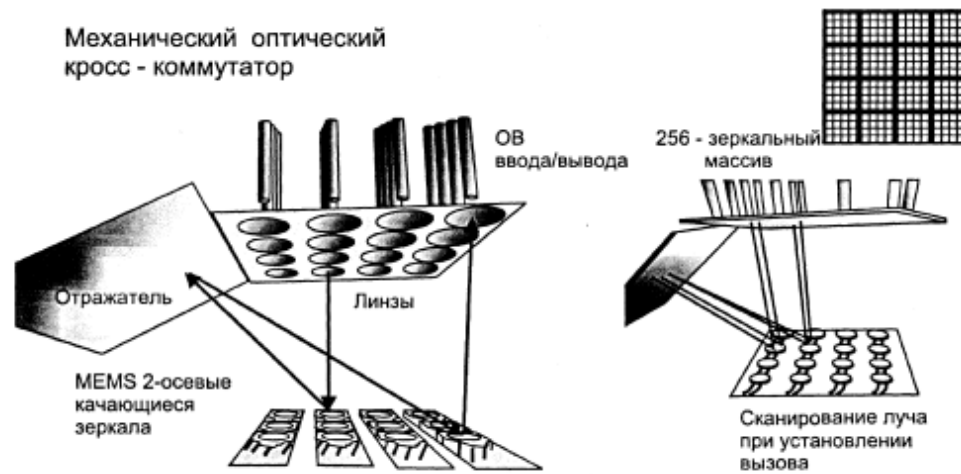


Рис. 1.10. Мікроелектромеханічний оптичний комутатор

#### 1.4.4. Оптичні мультиплексори / демультиплексори

Системи ВОЛЗ з многоволновою ущільненням - WDM, DWDM і CWDM були б неможливі без пристроїв об'єднання просторово розділених оптичних інформаційних потоків з  $X_1, X_2 \dots X$ , в один потік з загальним напрямком (на передачу) і пристроїв, що виконують зворотну операцію (на прийомі). Це завдання вирішується за допомогою мультиплексорів / демультиплексорів. Крім систем ВОЛЗ з DWDM, мультиплексори застосовуються в волоконно-оптичних підсилювачах, в локальних мережах при хвильовій маршрутизації і в деяких інших випадках.

За характером розв'язуваної задачі мультиплексори можна розділити на два типи: мультиплексори, які об'єднують невелику кількість спектральних каналів (не більше 4-х) при відстані між каналами по довжині хвилі від часток до сотень



нм; і мультиплексори, які об'єднують кількість спектральних каналів більше 8-ми: 8, 16, 32, 40 - до 160 і більше при відстані між каналами (частотний інтервал або крок) по довжині хвилі від 0,4 нм до 0,08-0,04 нм.

За принципами роботи, улаштування та технології виготовлення оптичні мультиплексори також можна розділити на два типи: оптичні мультиплексори (ОМ), засновані на використанні дифракційних решіток, і ОМ, робота яких заснована на властивості та характеристики багатошарових оптичних інтерференційних покриттів - інтерференційних фільтрів.

## 2. ТЕХНОЛОГІЯ УЩІЛЬНЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ

Мультиплексування з широким спектром довжин хвиль (Coarse Wavelength Division Multiplexing - CWDM) являє собою метод об'єднання декількох сигналів на лазерних пучках на різних довжинах хвиль для передачі по волоконно-оптичним кабелям таким чином, що кількість каналів менше, ніж при щільному мультиплексированні з поділом по довжині хвилі (DWDM), але більше, ніж в стандартному WDM. Системи CWDM мають канали на довжинах хвиль, розташованих на відстані 20 нанометрів (нм), в порівнянні з відстанню 0,4 нм для DWDM. Це дозволяє використовувати недорогі неохолоджувані лазери для CWDM. У типовій системі CWDM лазерні випромінювання відбуваються на восьми каналах на восьми певних довжинах хвиль 1610 нм, 1590 нм, 1570 нм, 1550 нм, 1530 нм, 1510 нм, 1490 нм і 1470 нм. Але допускається до 18 різних каналів з довжиною хвилі до 1270 нм. Енергія від лазерів в системі CWDM розподіляється по більшому діапазону довжин хвиль, ніж енергія від лазерів в системі DWDM. Допуск (ступінь невязки або мінливості довжини хвилі) в CWDM-лазері складає  $\pm 3$  нм, тоді як в DWDM-лазері він набагато більш міцний. Через використання лазерів з меншою

точністю система CWDM дешевше і споживає менше енергії, ніж система DWDM. Однак максимальне можливу відстань між вузлами менше з CWDM.

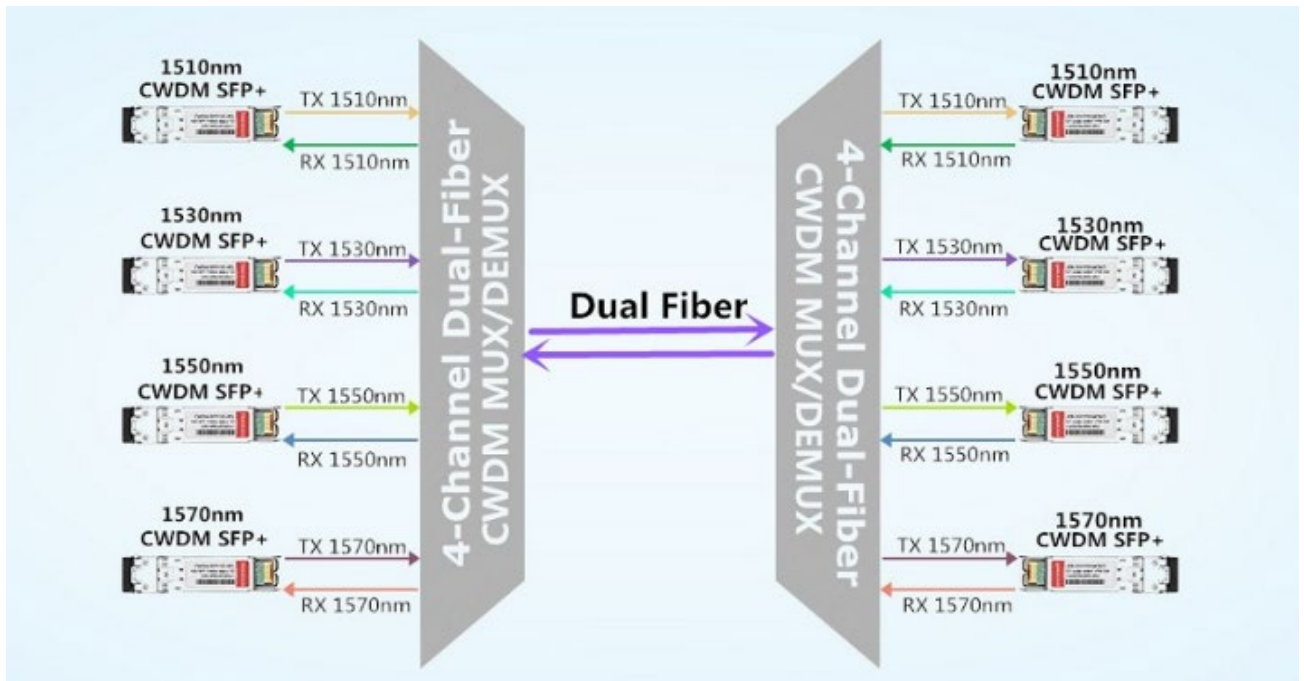


Рис. 2.1. Загальна картина CWDM-устаткування

CWDM - технологія мультиплексування по довжині хвилі для метро і регіональних мереж. Вона була стандартизована рекомендацією ITU-T G.694.2 на основі поділу сітки або довжини хвилі 20 нм в діапазоні 1270-1610 нм, таким чином, вона здатна переносити до 18 довжини хвилі CWDM над однією парою волокон. Кожному сигналу присвоюється інша довжина хвилі світла. Кожна довжина хвилі не впливає на іншу довжину, тому сигнали не заважають один одному. Кожен канал, як правило, прозорий для швидкості і типу даних, тому будь-яке з'єднання служб SAN, WAN, Voice і Video може транспортуватися одночасно по одній оптоволоконній парі.

Мух широко відомий як мультиплексор, який об'єднує кілька каналів довжини хвилі на одному волокні, а Demux знову розділяє їх на іншому кінці.

Налаштування Мух / Demux особливо корисна для збільшення наскрізний

ємності розгорнутого волокна. Мух зазвичай розташовується в центральному офісі, а блок Demux розташований або в шафі, або в закритті для зрощування, з якого волокна йдуть в пункт призначення в зіркоподібною топології.

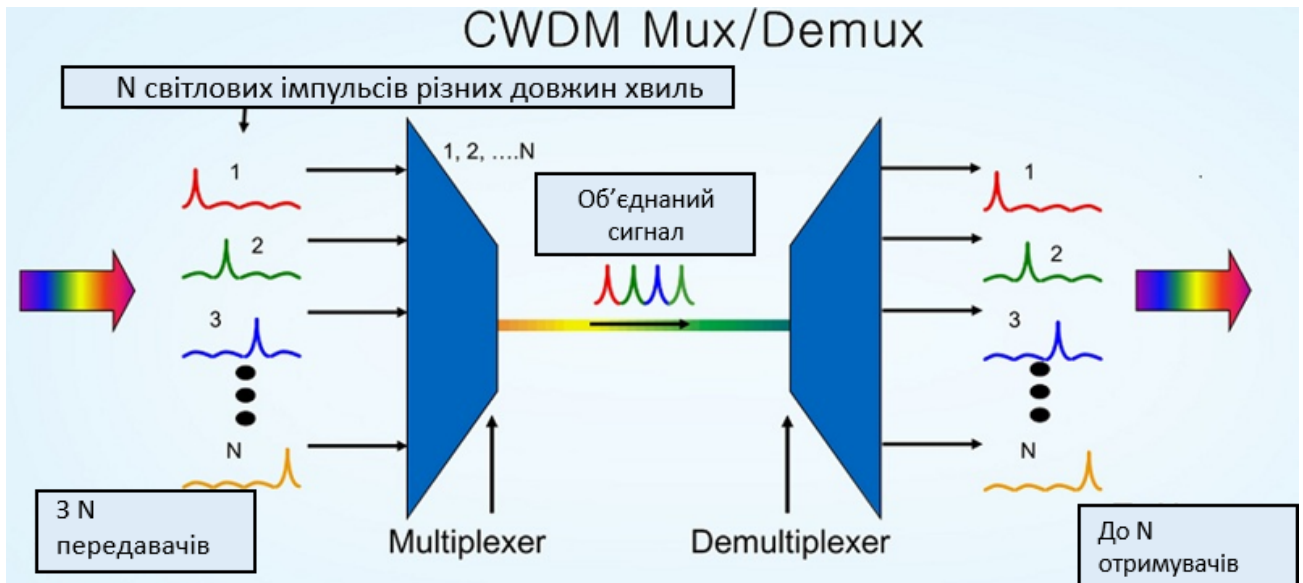


Рис. 2.2. Принцип роботи технології

CWDM - це економічне рішення для підвищення пропускної здатності мережі доступу. Вона може задовольняти вимогам зростання трафіку без розбудови інфраструктури. Наприклад, типова 8-канальна система CWDM забезпечує в 8 разів більшу пропускну здатність, яка може бути досягнута з використанням системи SONET / SDH для даної швидкості лінії передачі і використання тих же оптичних волокон. Це ідеальна альтернатива для операторів, які прагнуть збільшити пропускну здатність своєї встановленої оптичної мережі без заміни існуючого обладнання і без установки нових волокон.

Двухмодовий CWDM Mux Demux - це мультиплексування пасивного пристрою і демультіплексування довжин хвиль для розширення пропускної здатності мережі, які повинні працювати парами для двобічної передачі за подвійним волокном. Він дозволяє до 18 каналів для передачі і прийому 18 видів сигналів з

довжиною хвилі від 1270 до 1610 нм. Приймач CWDM, вставлений в волоконно-оптичний порт Mux, повинен мати ту ж довжину хвилі, що і порт Mux, щоб завершити передачу сигналу.

При виборі кількості каналів слід звернути увагу на тип використовуваного одномодового волокна. Наприклад, в волокнах типу G.652B (волокно з водяним піком на довжині хвилі 1383 нм) на коротких довжинах хвиль великих втрат на випромінювання, в зв'язку з цим допустима відстань передачі скорочується і кількість CWDM каналів буде менше необхідного [4].

## 2.1. Використання технології CWDM

Технологія CWDM найкраще підходить для побудови каналів протяжністю до 80 км. Як правило, до цієї категорії відносяться лінії зв'язку між вузлами доступу і комутаційними центрами мережі провайдера. Системи CWDM дозволяють заощадити чимало коштів на витратах побудови і модифікації волоконних ліній, вузлів, оренди волокна, забезпечуючи високу ступінь ефективності, безпеки, стабільності та якості обслуговування з'єднань.

У системах CWDM, відповідно до рекомендації MCE G.694.2 слід використовувати не більше 18 несучих з кроком 20 нм: 1270, 1290, 1310 ... 1570, 1590 1610, тобто якщо загальна необхідна ширина діапазону довжин хвиль не перевищує 340 нм. Слід врахувати, що на краях такого широкого діапазону затухання досить велике, особливо в області коротких хвиль. Збільшити число каналів до 18 дозволили так звані волокна з нульовим водяним піком (ZWPF, Zero Water Peak Fiber; LWPF, Low Water Peak Fiber), параметри яких визначає рекомендація ITU-T G.652.C / D. У волокнах даного типу усунутий пік поглинання на довжині хвилі +1383 нм і величина загасання на цій довжині хвилі складає близько 0,31 дБ / км, що цілком прийнятно для систем CWDM.

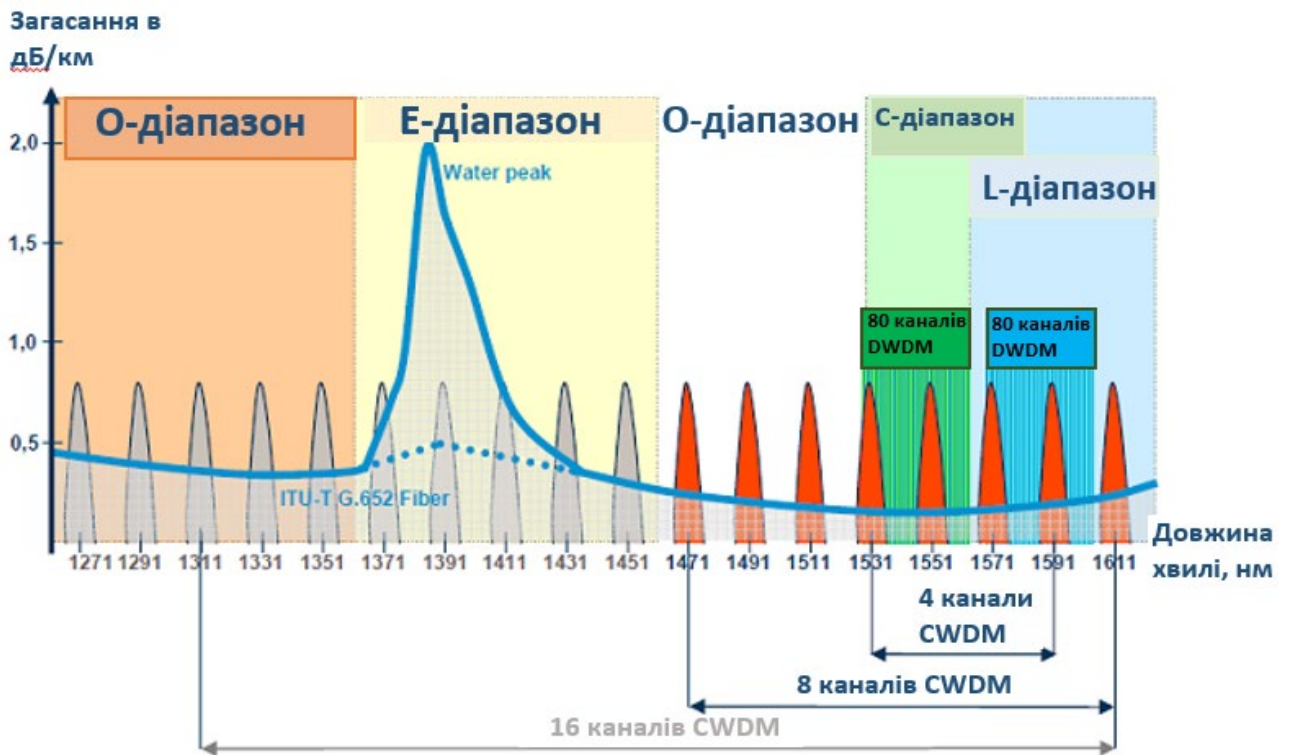


Рис. 2.2. Розподіл каналів CWDM відповідно до рекомендації G-694.2

Волокно G.653 виявилося непридатним для нової стрімко розвивається технології спектрального мультиплексування WDM через нульової дисперсії на 1550 нм, приводила до різкого зростання спотворень сигналу від чотирьох хвильового зміщення в цих системах. Найбільш пристосованим для щільного і високоякісного WDM (DWDM і HDWDM) виявилося оптичне волокно G.655, а для розрідженого WDM (CWDM) - недавно стандартизоване оптичне волокно G.656.

Табл 1.1. Застосування різних типів волокон

| Тип волокна   | Основне застосування   |
|---------------|--|
| G.652.C/D     | Системи SDH/CWDM/DWDM<br>Магістральна, зонова, міська мережа,<br>кабельне телебачення, PON, мережі<br>FTTH<br>Заміна волокна G.652.A/B з вікном<br>прозорості на 1400 нм |
| G.655         | Системи SDH/CWDM<br>Від 2.5 до 10 ГБіт/с на один оптичний<br>канал<br>Магістральна, зонова, міська мережа  |
| G.655., G.656 | Системи SDH/CWDM/DWDM<br>Від 10 до 100 ГБіт/с на один оптичний<br>канал<br>Магістральна, зонова, міська мережа   |

Створення волокон без «водяного піку» дозволило використовувати в системах зв'язку все хвилі в діапазоні від 1260 до 1625 нм, - тобто там, де кварцове оптичне волокно володіє найбільшою прозорістю.

устаткування CWDM

CWDM структури є складовими частинами мережі оператора зв'язку і встановлюються між двома або більше вузлами зв'язку. Для того, що б забезпечити роботу CWDM системи на вузлі зв'язку необхідна наявність активних мережевих пристроїв з достатнім сумарною кількістю портів для установки CWDM SFP-трансиверів. Такими мережевими пристроями зазвичай є комутатори і маршрутизатори. У разі недостатньої кількості активних

мережевих пристроїв з необхідним сумарним кількістю SFP-портів можливе використання медіаконверторів зі слотами під CWDM SFP-трансивери. Таке рішення в ряді випадків так само є більш економічно вигідним [6].

## 2.2. Устаткування CWDM

Основними елементами CWDM систем є:

**CWDM мультиплексори / демультимплексори (MUX / DEMUX)** - дозволяють підсумовувати і розділяти оптичні сигнали.

**OADM модулі** - CWDM мультиплексори введення / виведення - дозволяють виділити і додати в волокно сигнал по певним несам.

**SFP CWDM модулі (SFP трансивери)** - формують і приймають оптичні сигнали (довжини хвиль) в CWDM системі; переводять сигнал з електричного (активне обладнання) в оптичний і назад.

Варто звернути увагу на те, що мультиплексори / демультимплексори і CWDM SFP трансивери працюють в парах. Відповідно це обладнання Type I і Type II. Така необхідність зумовлена тим, що кожен канал на різних кінцях має дзеркальні значення з прийому (RX) і передачі (Tx), тому що сформований з двох несучих (довжин хвиль) [6].

### 2.2.1. CWDM SFP-трансивери

**SFP (Small Form Factor Pluggable)** є загальновизнаним індустріальним форматом виробництва змінних трансиверів. Трансивери SFP широко використовуються в активному мережному обладнанні: маршрутизаторах, комутаторах, автоматизації виробництва. Лазери з розподіленим зворотним зв'язком (DFB, Distributed Feedback), в разі використання в CWDM-системах, не вимагають термічної стабілізації, громіздких і складних схем управління, є малогабаритними, економічними і мають низьку ціну. Типовий DFB-лазер має температурну стабільність, що дає зміна генерується довжини хвилі в межах 6-8 нм в діапазоні температур 0-70°C.



Рис. 2.3. SFP-трансивери для різних дуплексних каналів



CWDM SFP трансивери призначені для формування оптичних CWDM сигналів «основною несучою» з 1270 по 1610нм (крок 20нм). Кожен SFP CWDM трансивер працює за двома волокнам і, на відміну від стандартних Двоволоконні трансиверів 1000Base LX, на двох різних довжинах хвиль - приймач по одній довжині хвилі і передавач по іншій. Для утворення каналу даних в системі CWDM SFP трансивери комплектуються «попарно» - Type I і Type II.

Табл. 2.1. Маркування каналів даних в системі CWDM

| Колір        | Type I        | Type II       |
|--------------|---------------|---------------|
| Сірий        | Tx1470/Rx1310 | Tx1310/Rx1470 |
| Фіолетовий   | Tx1490/Rx1330 | Tx1330/Rx1490 |
| Синій        | Tx1510/Rx1350 | Tx1350/Rx1510 |
| Зелений      | Tx1530/Rx1370 | Tx1370/Rx1530 |
| Жовтий       | Tx1550/Rx1390 | Tx1390/Rx1550 |
| Помаранчевий | Tx1570/Rx1410 | Tx1410/Rx1570 |
| Червоний     | Tx1590/Rx1430 | Tx1430/Rx1590 |
| Коричневий   | Tx1610/Rx1450 | Tx1450/Rx1610 |

Оскільки CWDM системи є пасивними, здійснення моніторингу стану CWDM обладнання і всієї траси в цілому в режимі реального часу представляється скрутним. Для моніторингу в режимі реального часу (online моніторингу) використовуються CWDM SFP-трансивери з функцією DDM (Digital Diagnostic Monitoring). Функція DDM дозволяє в режимі реального часу контролювати параметри, які має SFP-трансивер: потужність вхідного сигналу (RX), потужність вихідного сигналу (TX), температурні параметри роботи трансивера.

Зміни даних параметрів дозволяють судити про знос CWDM системи і стан траси в цілому. Функція DDM також використовується при оцінці оптичного бюджету CWDM рішення. Порівняння даних SFP-трансиверів дозволяє визначити реальні втрати по несучих в волокні.

SFP-трансивер так само відрізняється по дальності своєї роботи (потужності сигналу). CWDM SFP трансивер має стандартний кілометраж 10 км, 20 км, 40 км або 80 км. Стандартний тип роз'єму для коннектора на SFP трансивері – LC [6].

### 2.2.2. OADM

**OADM (англ. Optical Add-Drop Multiplexer)** - оптичний мультиплексор вводу / виводу. Пристрій використовують в разі, якщо «по дорозі» з пункту А в пункт Б з магістрального волокна необхідно вивести (або в магістральний волокно ввести) один або кілька дуплексних каналів зв'язку.

У самому простому випадку OADM - це той же «прохідний» мультиплексор з парою CWDM фільтрів всередині. Більш складні пристрої здатні працювати відразу на два напрямки, виводячи одні дуплексні канали зв'язку з одного боку, і вводячи інші з іншого (іноді на тих же самих довжинах хвиль).

OADM в заводському виконанні представляє собою невелику пластикову коробку магістральними та «абонентськими» висновками.

«Коробкове» рішення дуже зручно в експлуатації - поставив і забув, нічого не треба варити, нічого не треба тестувати - головне дотримуватися напрямки оптичних сигналів для коректної роботи. Крім того, коробочки рішення має малі внутрішні втрати за рахунок заводської збірки.

Недоліки готових OADM починають проявлятися вже на етапі їх покупки - дуже складно знайти пристрій, здатний задовольнити кінцевого провайдера, особливо якщо його інженери використовують нестандартні пари довжин хвиль для дуплексів або вводять / виводять не один дуплекс, а два або більше.

Крім того, коробочки рішення незручно при зміні топології або логічної схемотехніки мережі (їх неможливо розібрати і додати або витягти з них оптичні канали).

Тому багато постачальників CWDM обладнання взяли за практику не поставляти «коробкові» рішення, а покласти проектування і виготовлення OADM будь-якого формату на плечі провайдера.



Рис. 2.4. Модуль 1310 Add/1330 Drop 0.9мм 1м

Точка А і точка D пов'язані між собою безпосередньо одним дуплексним каналом зв'язку (довжини хвиль 1530нм і 1550нм). Точка А і точка В також пов'язані між собою одним дуплексним каналом зв'язку на довжинах хвиль 1470нм і 1610нм, при цьому в точці В ці довжини хвиль повністю виводяться з магістралі і далі не використовуються.

з точки А в точку С приходить один дуплексний канал зв'язку (довжини хвиль 1510нм і 1570нм), при цьому цей двобічний канал зв'язку повністю виключається з волокна в точці С.

Але на цих же довжинах хвиль (1510 нм і 1570 нм) з точки С в точку D піднімається новий двобічний канал зв'язку.

Як видно, при великій кількості введів / висновків можна використовувати одні і ті ж довжини хвиль кілька разів за умови, що вони не зайняті на поточному відрізку магістралі [5].

### 2.2.3. Недоліки CWDM

Незважаючи на цілий ряд переваг, CWDM системи ущільнення мають і низку недоліків, прісущіх недорогим системам оптичного зв'язку, а саме:

#### 1) Обмежений радіус дії.

Як і в простих системах оптичного зв'язку, оптичний сигнал CWDM діапазону неможливо посилити, а значить, дальність дії як і раніше обмежена оптичним бюджетом приймачів.

Ця дальність дорівнює 150км для гігабітних лінків і 80км для десятигігабітнихлінків.

Крім того, на 10G канали зв'язку починає впливати хроматична дисперсія, що також обмежує дальність дії;

#### 2) Додатковий бюджет втрат за рахунок використання пасивної апаратури ущільнення (CWDM, OADM), що вносить свої загасання.

#### 3) Неможливість оптичної регенерації групового CWDM сигналу і його спектральних складових.

CWDM діапазон досить широкий, а сучасні оптичні підсилювачі-регенератори на основі ербію не здатні впоратися з таким широким діапазоном.

Виходом зі сформованої ситуації може стати 3R регенерація - відновлення оптичної потужності, форми сигналу, синхронізація сигналу за часом і корекція помилок. 3R регенерацію можна здійснити за допомогою наступних дій:

1. Прийняти ослаблений оптичний сигнал;
2. Перевести оптичний сигнал в електричну форму;
3. Перевести сигнал з електричної форми назад в оптичну і видати його в лінію.

Для цих цілей необхідний як мінімум свитч, набір приймач і мультиплексори, що робить 3R регенерацію, особливо на швидкості 10Гбіт / с, досить дорогим задоволенням.

### 2.3. Будова мультиплексорів і демультиплексорів

**Мультиплексори та демультиплексори (MUX / DEMUX)** призначені для поєднання окремих одиничних каналів у груповий сигнал для одночасної передачі у межах одного волокна, а також для їх відповідному поділу (демультиплексуванню) на стороні отримувача. Вони складаються з одноканальних фільтрів, зроблених з використанням багат шарових тонкоплівкових фільтрів (англ. Thin Film Filter).

Фільтр працює за наступним принципом: оптичний сигнал на частоті, що відповідає одній зі складових сітки CWDM, може передаватися між портами фільтра під назвами Pass і Com. Затухання сигналу між цими портами коливається від 0,3 дБм до 0,8 дБм. Решта довжин хвиль діапазону CWDM не передаються між цими портами, тобто вони фільтруються та передаються між портами Reflection і Com. Внесене затухання оптичного сигналу між цими

портами – також від 0,3 дБм до 0,8 дБм. Порти Pass та Reflection ізолювані один від одного, оптичний сигнал між ними не передається.

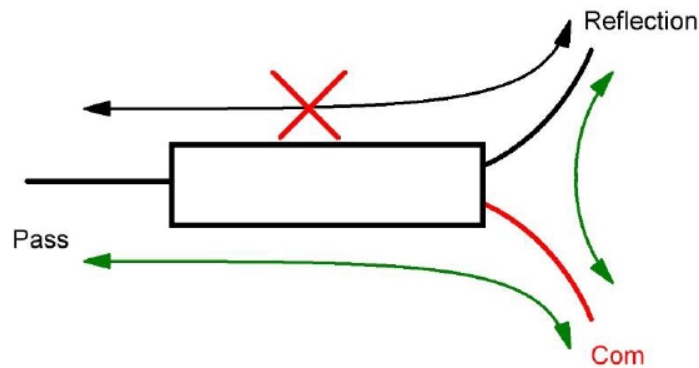


Рис. 2.5. Схема взаємодії портів фільтра.

При виборі фільтрів CWDM, окрему увагу слід звернути на частотний діапазон або смугу пропускання між портами Pass і Com, на який налаштований фільтр. Коли сигнал передається трансивером, його ширина сигналу становить 1 нм. Лазери, що використовуються в таких приладах, не мають температурної стабілізації, тому частота хвилі носія в них може зміщуватись. У якісних приймально-передавальних пристроях довжина хвилі може змінитися в діапазоні від 6 до 7,5 нм від центральної частоти несучої хвилі, однак є зразки приймально-передавальних пристроїв, де цей діапазон є ширшим. Якщо частота лазера не відповідає робочому діапазону фільтра, може статися ситуація (наприклад, при нагріванні лазера), коли переданий оптичний сигнал, що проходить через фільтр, буде істотно ослаблений або повністю подавлений фільтром. Саме по цій причині при створенні та проектуванні систем CWDM необхідно порівнювати характеристики трансиверів та використовуваних фільтрів.

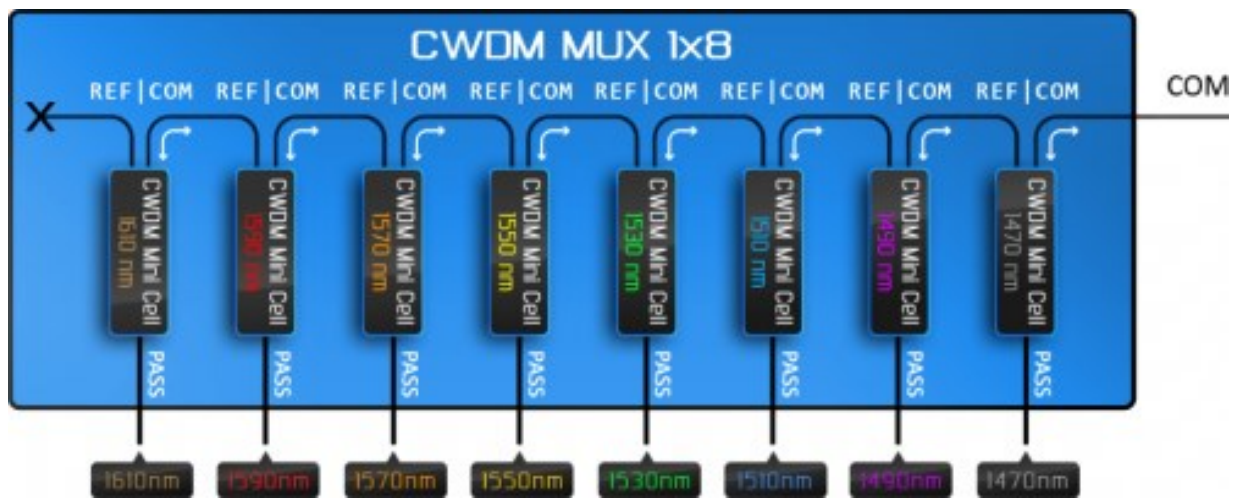


Рис. 2.6. Традиційна схема мультиплексора CWDM

Вище проілюстровано приклад принципової схеми оптичного мультиплексора/демультиплексора CWDM на основі тонкоплівкових фільтрів. Кожен фільтр працює на визначеній довжині хвилі з сітки CWDM, та з'єднуються один з одним наступним чином: порт Com з портом Reflection наступного. Порт Reflection першого фільтра в ланцюзі позначений як Upgrade, порт Com останнього – як Line, він включається в лінію. Внесене загасання на всьому мультиплексорі для кожного каналу N можна розрахувати за формулою:

$$IL = IL_{Pass-Com} + (IL_{Ref-Com}(N-1)),$$

де  $IL_{Pass-Com}$  — загасання на ділянці Pass-Com фільтра N,  $IL_{Ref-Com}$  — усереднене значення внесеного загасання на ділянці Reference-Com одного фільтра.

Такий устрій дозволяє застосовувати для прийому та передачі будь-які комбінації довжин хвиль, у більшості випадків вони обираються виходячи із характеристик трансиверів CWDM.

В оптичній лінії, величина внесеного загасання залежить від довжини хвилі (наприклад, для 1550 нм воно складає приблизно 0,2 дБм на кілометр, а для 1310 нм — приблизно 0,4 дБм на кілометр), необхідно розташовувати фільтри

таким чином, щоб "нижні" довжини хвиль розташовувалися ближче до порту Com мультіплексора. Таким чином внесене загасання для каналів які працюють на такій частоті, є меншим, ніж для "верхніх" довжин хвиль. Значення максимального внесеного загасання, вказане в технічних характеристиках мультіплексора, розраховується виходячи з величини загасання для найвіддаленішого від порту Com фільтру [6].

#### 2.4. Топологія побудови ВОЛЗ

Багато найважливіших характеристик мереж зв'язку визначається їх топологією, що характеризує пов'язаність вузлів мережі лініями зв'язку і дозволяє оцінити надійність і пропускну здатність мережі при пошкодженнях.

Вибір топології ґрунтується на розумному компромісі між надійністю мережі, її вартістю та простотою технічного обслуговування. При проектуванні систем для залізничного зв'язку пріоритетними є показники надійності, які пов'язані зі здатністю відновлення після відмов в мережі, включаючи відмови ліній зв'язку, вузлів і кінцевих пристроїв.

Топологія мережі повинна забезпечувати локалізацію несправностей, можливість відключення відмовив обладнання, введення обхідних маршрутів і зміни конфігурації мережі.

Простота технічного обслуговування мережі визначається тим, наскільки обрана топологія дозволяє спростити діагностування, локалізацію та усунення несправностей.

Вартість мережі багато в чому залежить від числа і складності вузлів і ліній зв'язку. Обрана топологія мережі повинна, по можливості, забезпечувати оптимальне поєднання вузлів лініями зв'язку так, щоб загальна вартість



передавальної, апаратної середовищ і програмного забезпечення була мінімальною.

Лінійної топологією, або схемою «точка-точка», прийнято називати схему, яка б пов'язала два вузла мережі (кінцеві станції), на кожному з яких формуються і закінчуються всі інформаційні потоки, що передаються між вузлами. Для їх передачі за допомогою ВОСП використовуються два волокна (по одному в кожному напрямку передачі), а при резервуванні волокон - чотири (резерв 1 + 1 або 1: 1), (рисунки 2.7, а). Вона є найбільш простий і використовується при передачі великих цифрових потоків по високошвидкісним магістральним каналам.

Розвитком лінійної топології при послідовному з'єднанні вузлів мережі (або декількох пунктів виділення каналів) є ланцюг топологія з можливістю багаторазового введення-виведення в вузлах мережі (пунктах виділення каналів) одного загального для всіх пунктів виділення каналу (схема «точка-многоточка») або різних каналів з єдиного цифрового потоку, (рисунки 2.7, б).

Топологія «Зірка» характеризується тим, що кожен вузол мережі (пункт виділення каналів) має двосторонній зв'язок по окремій лінії з центральним вузлом - концентратором (володіє функціями мультиплексора введення - виведення і системи кросової комутації), завдяки якому і забезпечується повна фізична зв'язність мережі, (рисунки 2.7, г). Необхідно відзначити, що при загальному стандартному наборі функцій обладнання SDH / СЦІ, який визначається рекомендаціями МСЕ, мультиплексори, що випускаються конкретними виробниками обладнання можуть не мати повний набір перерахованих вище можливостей, або, навпаки, мати додаткові.

Найхарактернішою топологією для мереж SDH / СЦІ є кільцева.

Вона характеризується тим, що вузли мережі (пункти виділення каналів) пов'язані лінійно, але останній з них з'єднаний з першим, утворюючи замкнуту петлю (кільце). У кільці можлива організація односпрямованої і двобічної передачі цифрового потоку між вузлами мережі.

Основна перевага цієї топології полягає в легкості організації захисту завдяки двом оптичним входів в мультиплексорах, що дозволяють створити подвійне кільце із зустрічними цифровими потоками. Система захисту організовується двома способами. Перший спосіб захисту дозволяє перемикає «основне» кільце на «резервне». У цьому варіанті блокові віртуальні контейнери мають доступ тільки до основного кільця. У разі обриву ВОК відбувається замикає основного і резервного кільця на кордонах пошкодженої ділянки. При цьому приймач передавач вихідного блоку мультиплексора з'єднується з тієї його стороною, де стався обрив кабелю. Це призводить до утворення нового кільця. Другий спосіб полягає в тому, що блокові віртуальні контейнери передаються одночасно в двох протилежних напрямках по різних кільцях. Якщо відбувається збій в одному з кільця, система управління автоматично вибирає той же блок з іншого кільця. Програми управління мультиплексорами підтримують або один з двох, або обидва способи захисту.

Кільце, організоване оптичними волокнами всередині одного ВОК називається «плоским». При використанні волокон кабелів, прокладених по різних трасах між вузлами мережі (пунктами виділення каналів) і двобічної передачі цифрового потоку, кільце є «опуклим» (рисунок, 2.7, в).

Найбільшою надійністю володіє кільцева топологія мережі з організацією опуклих кільця між вузлами і двобічної передачею цифрового потоку всередині кільця. Очевидно, що найбільша надійність кільцевих структур досягається тоді, коли кабельні траси кільця територіально рознесені. Залежно від призначення

ВОЛЗ можна організувати кільцеві структури для магістральної і дорожньої зв'язку з паралельним залізничним напрямками. Якщо це неможливо, для підвищення надійності ВОЛЗ можна замкнути кабельне кільце шляхом прокладки (підвіски) кабелю по різні боки залізниці або організувати паралельний радіорелейний тракт SDH / СЦІ. На практиці знаходять застосування топологія «плоского кільця», коли для замикання кільця використовуються оптичні волокна всередині одного кабелю.

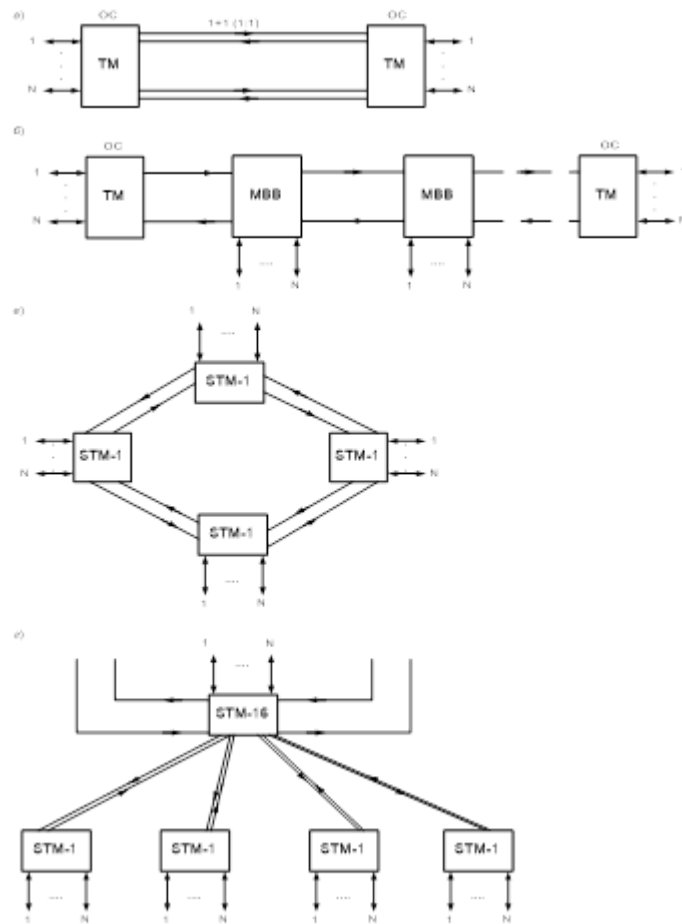


Рис. 2.7. Типи базових топологій цифрових мереж

При виборі топології мереж необхідно також враховувати число кінцевих пристроїв (КП) і пристроїв обробки інформації (ПОІ); територіальне

розташування КП і ПОІ; функціональне призначення і показники якості мережі; надійність мережі; вартість спорудження мережі; умови експлуатації; вимоги до маси і габаритним розмірам елементів мережі [7].

### 3. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1. Загальна інформація про мережу УРАН

Українська науково-освітня телекомунікаційна мережа УРАН (надалі – «Мережа УРАН») створена за рішенням Міністерства Освіти України та НАН України при підтримці університетів, інститутів Міністерства Освіти та НАН згідно зі Спільною Постановою Президії Національної Академії наук України і Колегії Міністерства освіти України від 20 червня 1997. В основу створення мережі покладено концепцією, ухвалену міжнародною нарадою «Комп'ютерна мережа закладів вищої освіти і науки України» за участю представників Наукового відділу НАТО (24-26 квітня 1997, м. Київ) та міжнародною конференцією «Комп'ютерні мережі в вищій освіті» (26-28 травня 1997, м. Київ). Проект став основою для розробки ряду Законів України, що стосуються концепції і завдань Національної програми інформатизації України групою експертів, залучених Верховною Радою України. Результатом цієї роботи стало включення в Національну програму завдання створення комп'ютерної мережі установ науки, освіти і культури України.

Головним призначенням мережі УРАН є забезпечення установ, організацій та фізичних осіб в сферах освіти, науки та культури України інформаційними послугами на основі Інтернет-технологій для реалізації професійних потреб та розвитку зазначених галузей. Такі послуги передбачають, зокрема, оперативний

доступ до інформації, обмін нею, її розповсюдження, накопичення та обробку для проведення наукових досліджень, дистанційного навчання, використання методів телематики, функціонування електронних бібліотек, віртуальних лабораторій, проведення телеконференцій, реалізації дистанційних методів моніторингу, тощо.

Мережа УРАН будується за ієрархічним принципом: в кожному місті України, що є значним осередком наукової та освітньої діяльності, створюється регіональний вузол мережі на базі університету або наукової установи міста.

Функціями базової організації є

- підтримка постійних контактів з місцевими органами державної влади та науково-освітніми установами,
- сприяння експлуатації мережі УРАН в регіоні,
- активна участь в розробці проектів її розвитку,
- залучення коштів для реалізації цих проектів за рахунок державного та місцевого (обласного) бюджетів, міжнародних грантів, благодійних внесків (у тому числі у вигляді гуманітарної та технічної допомоги), дотацій або субсидій з державних та недержавних цільових фондів і організацій тощо.

Базовою організацією Центрального вузла мережі УРАН є Державне Агентство України з питань науки, інновацій та інформатизації. Головний центр керування забезпечує основний інформаційний сервіс мережі та функціонування її бекбону і, крім того, функції регіонального вузла для користувачів Київського регіону.

Розбудова міських волоконно-оптичних сегментів здійснюється починаючи з 1997 року в рамках інфраструктурних грантів НАТО (NIG 971779 в 1997,

NIG 975961 в 2000, NIG 978384 в 2001, NIG 981531 в 2004, NIG 983279 в 2008) і державного замовлення з боку Міністерства освіти і науки України.

Сьогодні мережа УРАН фізично об'єднує понад 80 науково-дослідницьких та освітніх закладів (180 точок підключення) та експлуатує власні волоконно-оптичні мережі в 15 містах України загальною довжиною близько 230 км і міжнародну волоконно-оптичну лінію зв'язку довжиною 80 км Львів - державний українсько-польський кордон.

Сьогодні мережа УРАН фізично об'єднує понад 80 науково-дослідницьких та освітніх закладів, приблизно 180 точок підключення, та експлуатує власні волоконно-оптичні лінії в 15 містах України загальною довжиною близько 230 км. Зокрема, до мережі під'єднано приблизно половина всіх українських ВНЗ (III—IV рівнів акредитації), в яких навчається близько 66 % всіх студентів країни.

Сегмент будується за ієрархічним принципом: в кожному місті, що є значним осередком наукової та освітньої діяльності, створюється регіональний вузол мережі на базі університету або наукової установи міста.

Підключення до мережі відбувається виключно через виділені лінії зв'язку по волоконно-оптичних або мідних жилах. Користувачі мають змогу використати підключення на максимально можливій фізичній швидкості, вона обмежується виключно технічними характеристиками каналу, між двома точками зв'язку.

До переліку послуг можливо віднести: оперативний доступ та обмін інформацією, її розповсюдження та накопичення, обробка для проведення наукових досліджень, дистанційне навчання, використання методів телематики, використання електронних бібліотек, віртуальних лабораторій, проведення відео конференцій, реалізація дистанційних методів моніторингу, тощо [12].

Одночасно мережа виконує подвійну функцію:

- 1) корпоративної телекомунікаційної мережі, яка забезпечує сервіси зв'язку та об'єднує науково-освітні заклади між собою і, через пан'європейську науково-освітню телекомунікаційну мережу GÉANT, з науково-освітніми установами країн Європи;
- 2) мережі доступу в Інтернет, яка забезпечує клієнтам подачу трафіку сторонніх інтернет-провайдерів через один з існуючих шлюзів УРАН у глобальну мережу [8].

### 3.2. Волоконно-оптичний сегмент мережі УРАН в Одесі

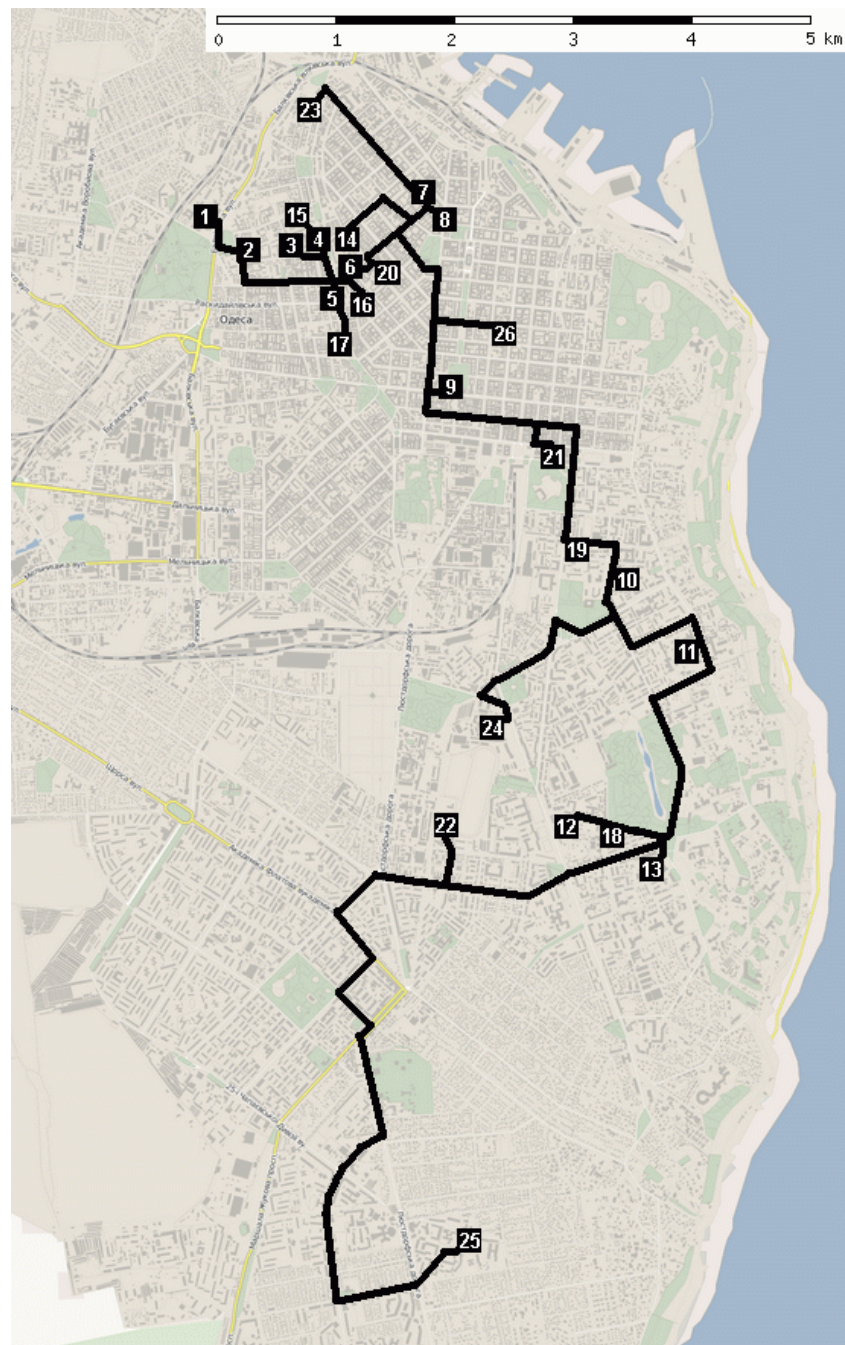


Рис. 3.1. Географічна схема мережі УРАН у м. Одеса



## ТОЧКИ ПРИСУТНОСТІ

1. Вузол міжміського зв'язку: філія ЗАТ Датагруп - Балківська, 42А
2. Одеська національна морська академія - Дідріхсона, 8
3. Одеська державна академія будівництва і архітектури - Дідріхсона, 4
4. Одеський національний морський університет - Мечнікова, 34
5. Південноукраїнський державний педагогічний університет (ПДПУ) - Старопортофранківська, 26
6. Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова (ОНАЗ) - Ковальська, 1
7. Одеський національний університет ім. І. Мечникова (ОНУ) - Дворянська, 2
8. Одеська державна академія холоду - Дворянська, 1/3
9. Одеська точка обміну інтернет-трафіком OdEx - Велика Арнаутська, 72/74
10. Одеський національний політехнічний університет (ОНПУ) - просп. Шевченка, 1
11. ОНУ, навчальний корпус - Французський бульвар, 26/28
12. Одеська національна юридична академія - Варламова, 2
13. Національна академія державного управління (НАДУ), Одеське відділення - Генуезська, 22
14. ОНУ, навчальний корпус - Новосельського, 62
15. ПДПУ, навчальний корпус - Ніщинського, 1
16. ОНАЗ, студентський гуртожиток - Старопортофранківська, 71А
17. ПДПУ, наукова бібліотека - Старопортофранківська, 36
18. ОНАЗ, студентський гуртожиток - Варламова, 20
19. Одеський державний аграрний університет (ОДАУ) - Канатна, 99
20. Одеська державна музична академія імені А.В.Нежданової - Новосельського, 63

- 21.ОДАУ, навчальний корпус - Пантелеймонівська, 13
- 22.ОДАУ, навчальний корпус - Краснова, 3А
- 23.ПДПУ, навчальний корпус - Старопортофранківська, 2-4
- 24.ПДПУ, навчальний корпус - Фонтанська дорога, 4
- 25.ПДПУ, навчальний корпус - Олександра Невського, 39
- 26.ПДПУ, навчальний корпус - Єврейська, 25

Мережа у місті побудована за принципом "по окремому волокну від вузла мережі до кожного із споживачів", тобто являє собою одножильну волоконно-оптичну лінію зв'язку, де по одній жилі передаються сигнали в двох вікнах прозорості: передача – в діапазоні близькому до 1550 нм, прийом – 1380 нм, і навпаки. Це технологія Bi-Di (bi-directional), тобто у два напрямки [8].

Міська волоконно-оптична телекомунікаційна мережа на основі пасивних оптичних селективних розгалужувачів

#### 4. МІСЬКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА МЕРЕЖА НА ОСНОВІ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ СЕЛЕКТИВНИХ РОЗГАЛУЖУВАЧІВ У М. ОДЕСА

##### 4.1. Аналіз наявної топології мережі та обґрунтування розробки модернізації з використанням CWDM

На даний момент мережа УРАН в Одесі нараховує 26 точок присутності, що розташовані на території кампусів або окремих будівель науково-освітніх установ міста.

На 6 з цих точок присутності облаштовано вузли мережі -технологічні майданчики, де встановлено активне каналоутворююче обладнання (комутатори), до яких, власне, і підключені локальні мережі абонентів.

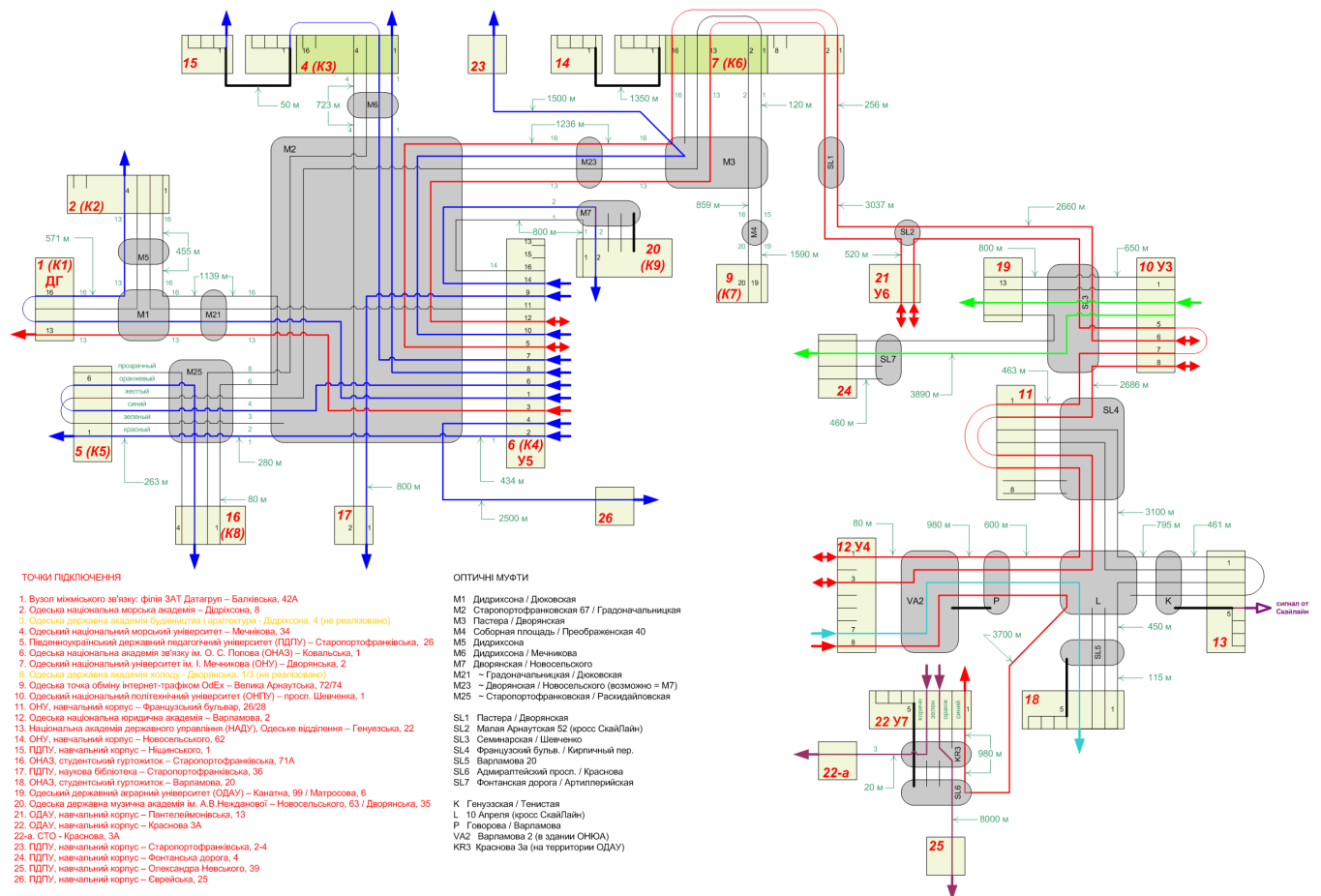


Рис. 4.1. Топологія мережі «УРАН» в м. Одеса

## ОПТИЧНІ МУФТИ

1. M1 – Діагност/Дюковська
2. M2 – Старопортофранківська 67/Градоначальницька
3. M3 – Пастера/Дворянська
4. M4 – Соборна площа/Преображенська 40
5. M5 - Діагност
6. M6 – Діагност/Мечникова
7. M7 – Дворянська/Новосельського

- 8. M21 – Градоначальницька/Дюковська
- 9. M23 – Дворянська/Новосільського
- 10.M25 – Старопортофранківська/Розкидайлівська

- 11.SL1 – Пастера/Дворянська
- 12.SL2 – Мала Арнаутська 52 (кросс Скайлайн)
- 13.SL3 – Семінарська/Шевченка
- 14.SL4 - Французький бульвар/Провулок Цегляний
- 15.SL5 – Варламова 20
- 16.SL6 – Адміралтейський просп./Краснова
- 17.SL7 – Фонтанська дорога/Артилерійська

- 18.K – Генуезська/Тениста
- 19.L – 10 Квітня (кросс СкайЛайн)
- 20.P – Говорова/Варламова
- 21.VA2 – Варламова 2 (у будівлі ОНЮА)
- 22.KR3 – Краснова 3а (на території ОДАУ)

Основне джерело нестабільності роботи мережі - ненадійне енергопостачання на більшості вузлів мережі.

В разі відсутності живлення на вузлі зв'язок втрачають всі абоненти, які підключені до цього вузла, незважаючи на те, що у них самих в цей момент енергопостачання не порушено.

Мета роботи: Розробити проект переобладнання каналоутворюючого обладнання мережі для максимального усунення залежності надійного надання послуг абоненту від можливого порушення електроживлення на проміжних вузлах.

Для цього в мережі має бути впроваджена технологія CWDM з організацією декількох дуплексних каналів передачі даних в одному волокні на різних довжинах хвиль згідно зі стандартом ITU-T G.694.

Активне каналоутворююче обладнання, за можливості, має бути зосереджено в єдиному місці - на технічному майданчику Одеської національної академії зв'язку ім. О. С. Попова (вул. Ковальська, 1), облаштованому системою резервного живлення достатньої потужності. В інших точках присутності має розміщатися лише пасивне обладнання - оптичні мультиплексори (MUX), демультимплексори (DEMUX), селективні відгалужувачі (OADM. optical add-drop multiplexer) та оптичні фільтри.

Не бажано виконувати роботи в міській телефонній каналізації, зокрема прокладати нові ділянки кабелів та здійснювати перепайки з'єднань наявних оптичних волокон в існуючих розгалужувальних муфтах.

Задля забезпечення безперервного сигналу точок присутності, що не є підключеними до вузла з резервним живленням було вирішено провести канал передачі даних у кабелі, що проходить крізь вузли мережі. Для цієї частини мережі має бути використана топологія «ланцюг» із використанням CWDM-технології та пасивних розгалужувачів - Add/Drop-модулів.

#### 4.2. Обладнання, необхідне для реалізації проекту

Мережа з використанням CWDM-технологій потребує характерний підбір обладнання:

- 1) Оптичні мультиплексори/демультимплексори – базис технології спектрального ущільнення.

- 2) SFP+ трансивери. Модулі є активним каналоутворюючим обладнанням, тобто транслює оптичний сигнал на обраній довжині хвилі. Швидкість передачі даних у подібних модулях становить 10 Гбіт/с.
- 3) Add/Drop-модулі. Пасивні відгалужувачі дуплексних каналів зв'язку (в нашому випадку один модуль – один канал). Є головним елементом вирішення проблеми. У сукупності є заміною демультиплексора.
- 4) Комутатори вищого рівня (вузлові), їх задача – глобальна маршрутизація трафіку між абонентами.

Наша компетенція обмежується оптичними засобами. Тобто ми можемо лише надати рекомендації щодо комутаторів, в яких необхідно буде розташувати SFP+ модулі, в точках присутності. Теж саме стосується комутатора на головному вузлі, який має велику кількість роз'ємів для трансиверів.

Також необхідно зазначити те, що в основі лінії зв'язку в Одесі використовується одномодове оптичне волокно з водяним піком. Саме тому необхідно уникнути або мінімзувати використання каналоутворюючого обладнання, що використовує довжини хвилі у так званому Е-діапазоні (від 1360 нм до 1460 нм) для того, щоб не стикнутися із великим загасанням сигналу [6].

#### 4.2.1. Оптичний мультиплексор

Перш за все, необхідно визначитися з основою CWDM – оптичним мультиплексором/демультиплексором.

Ознайомившись з доступними на ринку моделями, було визначено, що для коректного комбінування елементів у системі CWDM, необхідно використати одноволоконний MUX/DEMUX.

Такий вибір значно збільшує вимоги до кількості вільних оптичних жил, що в подальшому приведе до часткового обмеження підключення деяких закладів та часткової реалізації запланованої топології.

Наш вибір зупинився на восьмиканальному одноволоконному мультиплексорі SNR-CWDM-MDM-8-1U модель розробки компанії «НАГ» (рис. 4.3). Перелік несучих доступних хвиль було підібрано таким чином, щоб уникнути водяного піку.



Рис. 4.3. Восьмиканальний одноволоконний SNR-CWDM-MDM-8-1U розробки компанії НАГ

Таблиця 4.1. Характеристики восьмиканального MUX/DEMUX [12]

| Параметр                           | Значення                                       |
|------------------------------------|--|
| Кількість каналів                  | 8 (дуплексних)                                 |
| Доступні несучі довжини хвиль (нм) | 1450, 1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590 |
| Смуга пропускання (нм)             | <15  |
| Внесене згасання (дБ)              | <3,5   |
| Тип порту клієнта                  | LC/UPC   |
| Зворотні втрати (дБ)               | <45  |
| Робоча температура (°C)            | -10 ... ~70                                    |

#### 4.2.2. SFP-трансивери

Оскільки завданням є побудова системи в обхід активного каналоутворюючого обладнання на вузлах, для його здійснення необхідна відповідна кількість трансиверів. Додакового підключення потребують 7 абонентів. Отже необхідно задіяти сім пар передатчиків SFP+ із сімома різними довжинами несучих хвиль. Восьмиканальний мультиплексор/демультиплексор, який є основою нашої системи, має широкий ряд рекомендацій серед сумісних з ним модулів. Cisco CWDM-SFP10G-20SP (рис. 4.4) зацікавив нас великим вибором доступних довжин хвилі, починаючи з 1270 нм та зупиняючись на 1610 нм.





Рис. 4.4. Зовнішній вигляд Cisco CWDM-SFP10G-20SP

Оптичний пристрій серії CWDM-SFP10G-20L [13] призначений для застосування у волоконно-оптичних лініях зв'язку, таких як 10G Ethernet. Цей модуль використовується для одномодового волокна і працює на номінальній довжині хвилі з сітки CWDM. Доступні вісімнадцять центральних довжин хвиль від 1270 до 1610 нм з кроком 20 нм. Модуль оснащений роз'ємом SFP+, щоб забезпечити можливість швидкого підключення. Приймач даного пристрою може отримувати та обробляти будь-який оптичний сигнал з діапазону 1260-1620 нм. Це означає, що функція по виділенню окремої довжини хвилі належить демультиплексору, а ресивер SFP+ модуля приймає та конвертує будь-який сигнал з вказаного проміжку, що потрапив на його порт. Для забезпечення точки присутності на вул. Олександра Невського 39 рекомендуємо використатися трансивер більш дорогий CWDM-SFP10G-40L із максимальною довжиною кабелю 40 км, оскільки дана точка присутності віддалена додатково на 8км.

Таблиця 4.2. Технічні характеристики трансивера CWDM-SFP10G-20L [13]

|   |                                   |                                      |                       |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| <b>Тип форми</b>                          | SFP+                              | <b>Мах. швидкість передачі даних</b> | 11.0957Gbps           |
| <b>Довжина хвилі</b>                      | 1270-1610 нм                      | <b>Мах. відстань передачі</b>        | 40км                  |
| <b>Роз'єм</b>                             | LC Дуплекс                        | <b>Оптичні компоненти</b>            | DFB CWDM              |
| <b>Медіа</b>                              | SMF                               | <b>DOM Функція</b>                   | Є                     |
| <b>TX Потужність</b>                      | 0~5dBm<br>(2~6dBm для SFP10G-40L) | <b>Чутливість приймача</b>           | <-16dBm               |
| <b>Комерційний температурний діапазон</b> | 0 ~ 70°C (32 ~ 158°F)             | <b>Протоколи</b>                     | SFP+ MSA, CPRI, eCPRI |

#### 4.2.3. Пасивні відгалужувачі

Задля відгалуження необхідних каналів з єдиного потоку в кабелі необхідна присутність OADM – Optical Add/Drop Module. В ході аналізу будови мережі УРАН в м. Одеса було прийнято рішення задіяти OADM, які мають можливість відгалуження одразу двох різних дуплексних каналів зв'язку. Наш вибір зупинився на FRM220-OADM.



Рис. 4.5. Оптичний мультиплексор вводу-виводу FRM220-OADM [14]

Оптичний мультиплексор вводу-виводу FRM220 CWDM Optical Add / Drop Multiplexer - це плати з модульною конструкцією, які за стандартом G.694.2 від ITU-T підтримують світловий сигнал від 1270 до 1610 нанометрів з приростом в 20 нанометрів. Оптичний мультиплексор вводу-виводу FRM220-OADM виводить з магістралі оптичний сигнал (два оптичних сигнали) певної хвилі і дозволяє ввести новий сигнал з тією ж довжиною хвилі, приблизно на те саме місце магістралі. Всі світлові сигнали проходять оптичний мультиплексор вводу-виводу з незначними енерговтратами (зазвичай  $<2,5$  дБ, включаючи роз'єми та адаптери).

Зі збільшенням кількості OADM у мережі збільшується додаткове згасання не тільки на «відгалудженому» каналі, а й на «загальному».

Таблиця 4.3. Технічні характеристики FRM220-OADM [14]

|  |   |
|--|---|
| Кількість каналів                              | 1-2 канали додання-видалення  |
| Робочий канал CWDM Додання та видалення каналу | Будь які канали з 1471, 1491, 1511, 1531, 1551, 1571, 1591, 1611 нм<br>(визначаються через інформацію при замовленні) |
| Ширина каналу: CWDM канали                     | $\geq 13$ нм  |
| Втрати що вносяться                            | IN-OUT $\geq 2,5$ дБ<br>додткові втрати $< 2$ дБ  |
| Ізоляція                                       | CWDM ізоляція сусіднього каналу $> = 30$ дБ   |
| Оптичні зворотні втрати                        | $\geq 50$ дБ  |
| Втрати від поляризації                         | $\geq 0.1$ дБ   |
| Робоча температура                             | $0 \sim 50$ °C  |
| Габарити                                       | 162 x 220 x 25 мм   |

Рекомендовано замовити 6 модулів вводу/виводу для облаштування схеми.

#### 4.2.4. Вузлові комутатори

Комутатори вищого рівня відповідають за маршрутизацію трафіку в мережі. Наша вимога до них – достатня кількість слотів для підключення SFP+ модулів.

За попередніми розрахунками, для реалізації моделі мережі, нам знадобиться 7 трансиверів зі сторони головного вузла, де вже є зайнятими 12 гнізд.

В якості рекомендації можна представити пристрій S5850-32S2Q, який є високопродуктивним Leaf-комутатором рівня 3 висотою 1U з 32 портами 10Gb SFP + і 2 портами 40Gb QSFP +. Цей комутатор має повне системне програмне забезпечення з комплексними протоколами і додатками для прискорення розгортання та управління службами по традиційним мереж L2 / L3. Він є економічно ефективною Ethernet платформою доступу та агрегації до платформи ЦОД і ідеально підходить для вимогливих робочих навантажень.

Таблиця 4.3. Технічні характеристики S850-32S2Q [15]

|   |                              |                                    |            |
|---|------------------------------|------------------------------------|------------|
| <b>Інтерфейси</b>                       | 32 x 10G SFP+, 2 x 40G QSFP+ | <b>Комутаційна здатність</b>       | 800 Гбіт/с |
| <b>Non-blocking пропускна здатність</b> | 400 Гбіт/с                   | <b>Швидкість переадресації</b>     | 595.2 Mpps |
| <b>Розмір таблиці MAC адресів</b>       | 65,000                       | <b>Затримка</b>                    | 612 нс     |
| <b>Флеш-пам'ять</b>                     | 2GB                          | <b>DRAM</b>                        | 1Гб        |
| <b>Підтримка MLAG</b>                   | +                            | <b>Макс. споживана потужність</b>  | 150 Ватт   |
| <b>Буфер пакетів</b>                    | 9Мб                          | <b>Типова споживана потужність</b> | 120 Ватт   |

#### 4.3. Розробка топології мережі «УРАН» в м. Одеса на основі пасивних оптичних селективних розгалужувачів

Модернізований варіант мережі «УРАН» повинен являти собою змішані топології «Зірка» (вузол на вул. Ковальський, що має надійну систему резервного енергопостачання, та менш надійні вузли з комутаторами) і топології «Ланцюг» за участю пасивних оптичних селективних розгалужувачів.

Реалізацію останньої має бути досягнуто шляхом встановлення у вільні гнізда комутатора на «надійному» вузлі SFP+ трансиверів, з'єднанням із мультиплексором та створенням єдиного потоку в кабелі, що проходить поруч зі всіма іншими вузлами.

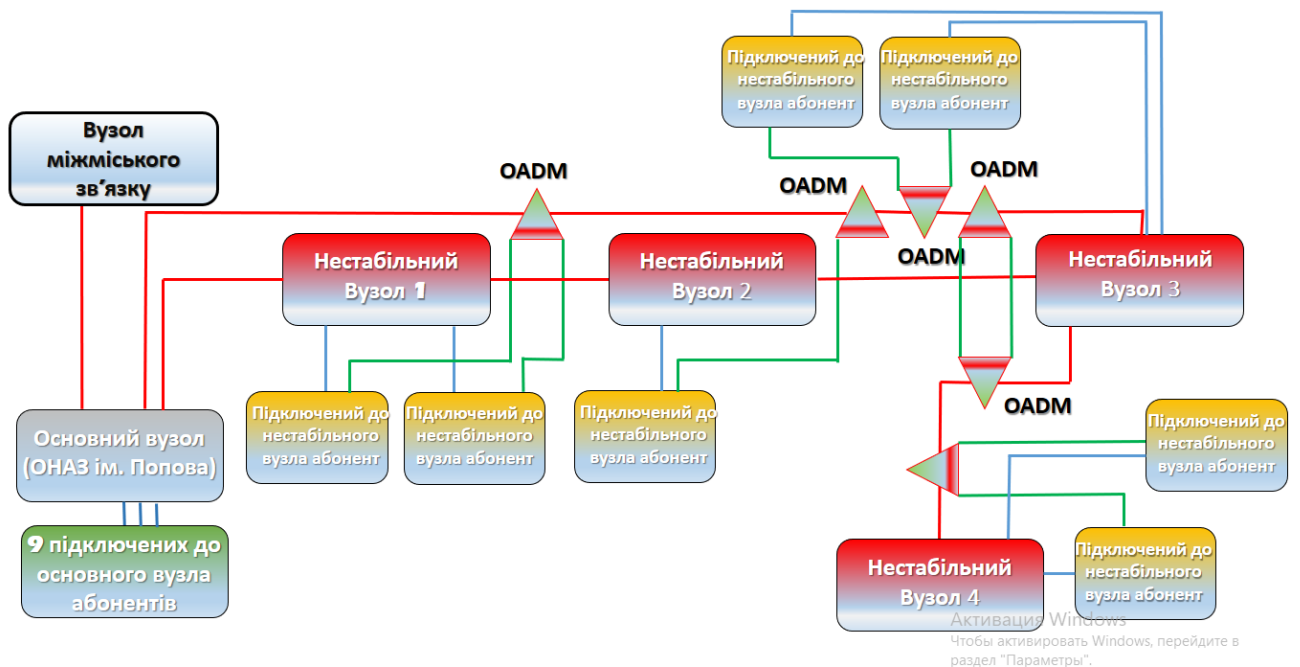


Рис. 4.6. Модель модернізованої мережі «УРАН» в Одесі

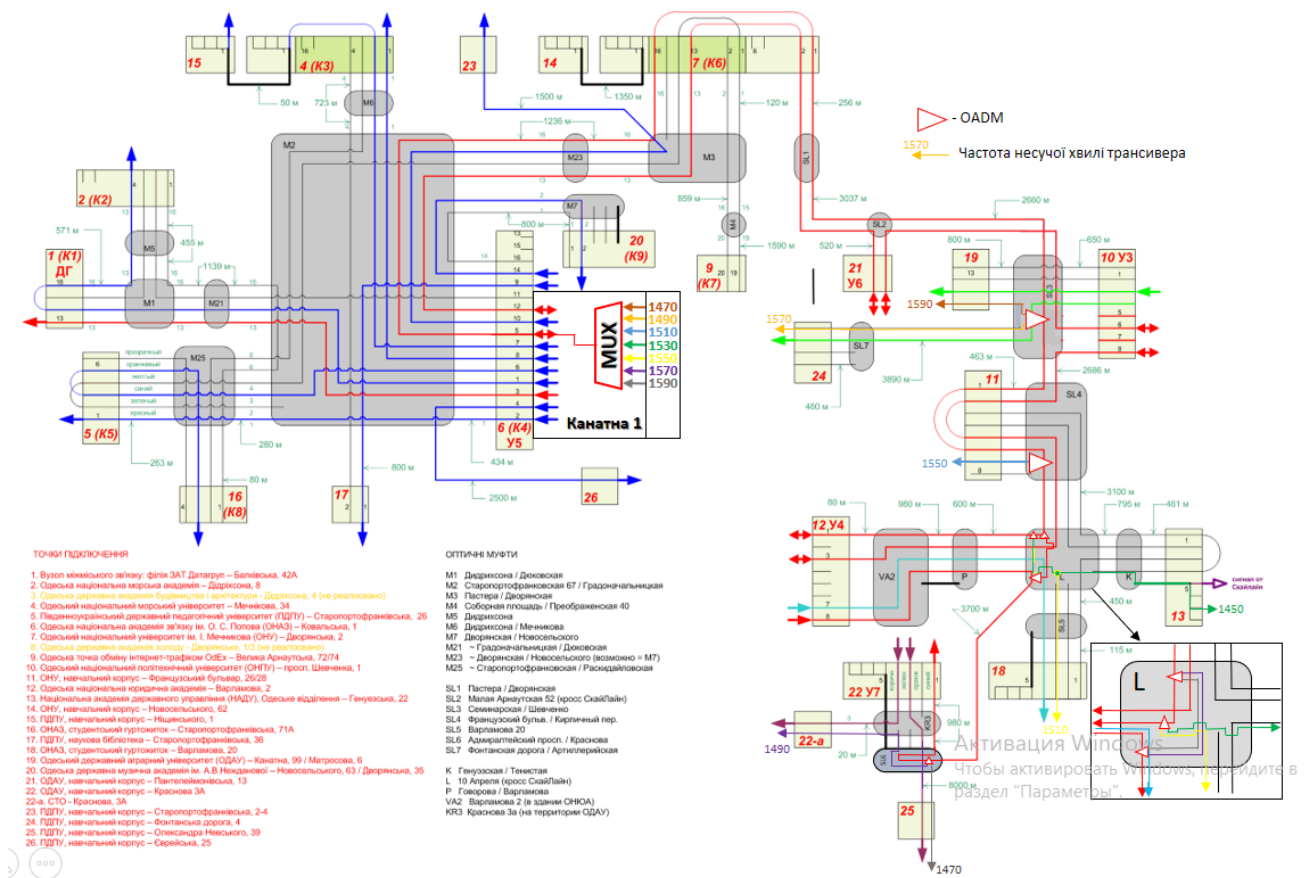


Рис. 4.7. Модернізована топологія мережі «УРАН» в Одесі

Задля вирішення проблеми необхідною вважаємо перекомутацію волокон у оптичних муфтах. Найбільш складні роботи триватимуть в оптичних муфтах SL3 (Семінарська/Шевченко) та L (вул. 10 квітня).

В першому випадку необхідно ліквідувати петлю, що проходить через технологічну площадку в точці присутності 10 (Одеський політехнічний інститут) і з'єднати кабелі таким чином, щоб у муфті з'явився обхідний по відношенню до вищевказаного вузла канал. В цій же муфті буде встановлено перший Add/Drop модуль, канали з якого мають забезпечити зв'язок з «надійним» вузлом ОДАУ і навчального корпусу ПДПУ (Фонтанська дорога, 4).

У другому випадку також необхідно встановити OADM для відгалуження двох каналів до НАДУ та гуртожитку ОНАЗ, а також встановити два OADM задля виведення з основного кабелю двох каналів і заведення їх назад, в обхід вузла, технологічний майданчик якого знаходиться в будівлі Одеської державної юридичної академії.

Встановлення OADM також передбачається в оптичних муфтах SL4 (Французький бульвар/провулок Цегляний) та SL6 (Адміралтейський просп./вул. Краснова) для відгалуження каналів зв'язку до навчального корпусу ОНУ та навчального корпусу ОДАУ (вул. Краснова, 3а) і навчального корпусу ПДПУ (вул. Олександра Невського, 39), відповідно.

На клієнтському комутаторі останнього рекомендовано встановити SFP+ трансивер, розрахований на підвищену довжину волокна. В ході виконання робіт використано 6 Add/Drop модулів, 14 трансиверів вісьмох різних довжин хвиль, 1 мультиплексор.



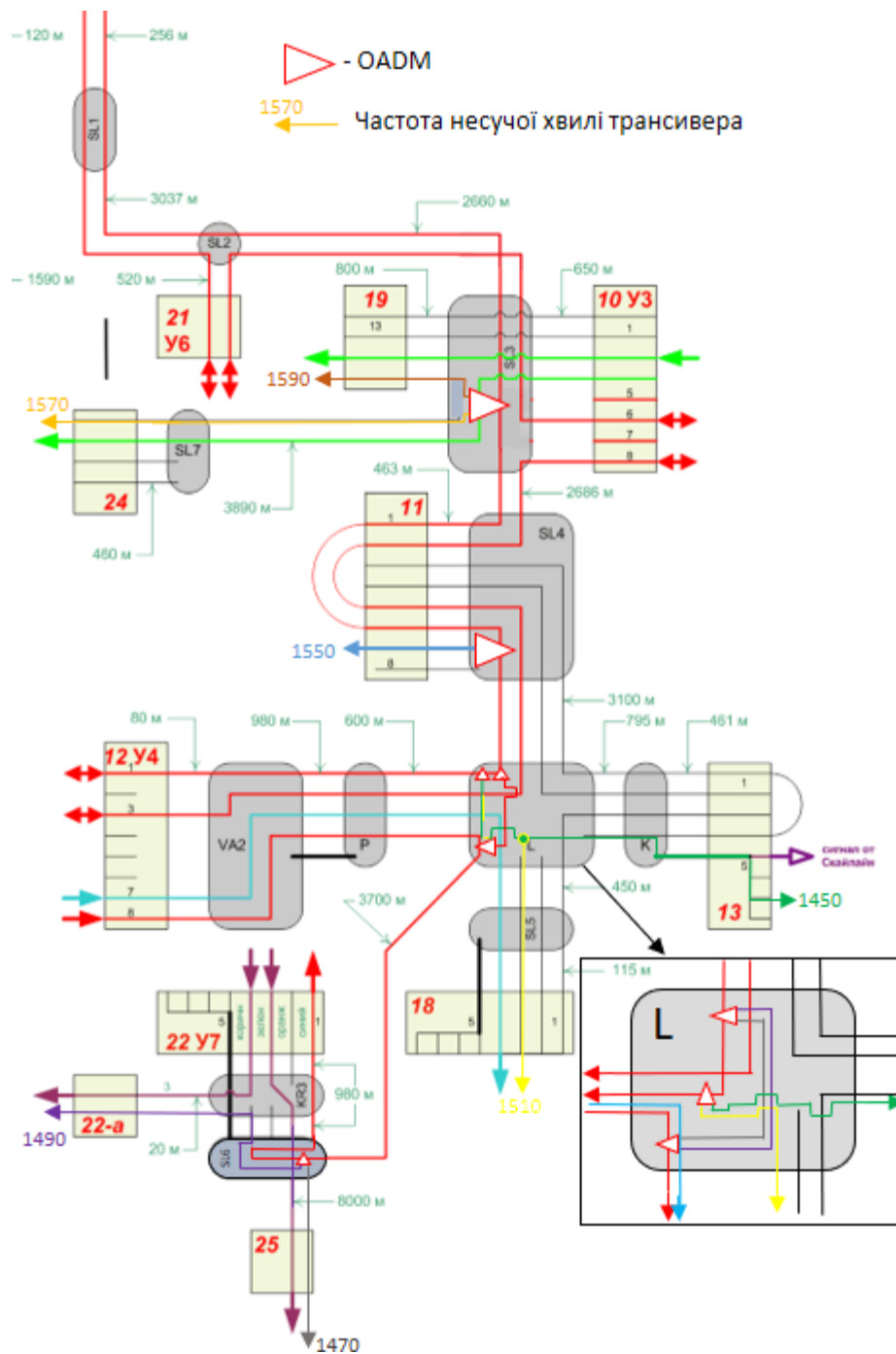


Рис. 4.8. Топологія «Ланцюг» у модернізованій системі «УРАН»

Зварювання оптоволокон наразі є найбільш досконалою технологією постійного з'єднання волокон. Сучасний апарат для зварювання оптичних волокон дозволяє отримати дуже низькі втрати на зварному з'єднанні – 0,01-0,02 дБ.

Цей спосіб широко використовується для постійного з'єднання багатомодового або одномодового волокна різних типів.

Також в місцях, де присутня необхідність з'єднати два кінці окремих жил, використовуються оптичні патч-корди (пігтейли) (рис 4.9).



Рис. 4.9. Одномодовий симплексний оптичний патч-корд.

Пігтейл – це відрізок кабелю, на кінці якого знаходиться конектор певного типу. З'єднання оптичного пігтейлу з волокном кабелю здійснюється шляхом зварювання або механічних нероз'ємних з'єднань. Внесене загасання такого рішення як правило не перевищує 0.3 дБ [11].

В разі налагодження роботи технологічних майданчиків, вплив яких було мінімізовано, можливе перепрацювання топології мережі на тип «Коло».

## ВИСНОВКИ

Поступово кількість користувачів ВОЛЗ у великих містах зростає.

Недосконалість обладнання та неможливість забезпечити його безперебійне живлення зумовлює необхідність у подальшому розвиненні ліній зв'язку.

Нами було розроблено проект модернізації топології мережі сегменту «УРАН» у місті Одеса, що базується на використанні технології CWDM та використання пасивних оптичних селективних розгалужувачів. Таке рішення дозволяє упередити проблеми із забезпеченням зв'язком точок доступу, під'єднаних до нестійких до сбоїв з електроенергією технологічних площадок, без додаткового прокладання оптичного волокна. Негативною стороною у використанні подібного методу є необхідність використання передавачів з великою потужністю сигналу.

Оскільки проект нововведень передбачає побудову мережі паралельно існуючій, нова топологія є основою для подальшого розвитку мережі та просування у бік утворення топології «коло». Обране обладнання має запас потужності та варіативності для майбутнього підключення нових клієнтів.

Застосування CWDM рішень значно спрощує внесення змін у лінію зв'язку завдяки модульності та легкому процесу встановлення компонентів. Також застосування CWDM-технології створило перспективу переходу деяких користувачів з поточної швидкості 1 Гбіт/с до 10Гбіт/с.

Запропонована волоконно-оптична лінія зв'язку із застосуванням грубого спектрального ущільнення в м. Одеса є ефективним рішенням актуальних на даний момент питань, таких як нестійкість системи до проблем з енергопостачанням вузлів мережі. До її переваг також можливо віднести відносно просту в реалізації та достатню надійність в процесі експлуатації.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ВОЛЗ: волоконно-оптичні лінії зв'язку. Оптичні лінії зв'язку Оптоволоконні телекомунікації [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://justrust.ru/uk/vols-volokonno-opticheskie-linii-svyazi-opticheskie-linii-svyazi/>.
2. История развития оптоволоконных линий связи [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rebico.ru/articles/historylinessvyazi.html>.
3. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2009. – 272 с.: ил. – (Серія «Библиотека инженера»)
4. Что такое мультиплексор и демультиплексор [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: [https://componentltd.ru/technical\\_information/articles/chto-takoe-multipleksor-i-demultipleksor/](https://componentltd.ru/technical_information/articles/chto-takoe-multipleksor-i-demultipleksor/).
5. Технология CWDM простыми словами: AddDrop модули (OADM) - для чего они нужны? [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <http://www.mlaxlink.ru/info/oadm>.
6. CWDM – это просто! [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <http://ic-line.ru/proekt-pro-cwdm/cwdm-eto-prosto/>
7. Проектирование инфокоммуникационной оптической сети железной дороги [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: [https://studbooks.net/716966/tehnika/proektirovanie\\_infokommunikatsionnoy\\_opticheskoy\\_seti\\_zheleznoy\\_dorogi](https://studbooks.net/716966/tehnika/proektirovanie_infokommunikatsionnoy_opticheskoy_seti_zheleznoy_dorogi)
8. Асоціація УРАН [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uran.net.ua/~ukr/frames.htm>.
9. Мережа УРАН. Одеса. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uran.net.ua/~ukr/frames.htm>.
10. Мережа УРАН Загальні відомості [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.uran.net.ua/~ukr/frames.htm>.

- 11.Одномодові оптичні кабелі і волокна на мережах зв'язку [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/articles/item/odnomodovi-opticheskie-kabeli-i-volokna-na-setjah-svjazi.html>
- 12.DATASHEET. 4 Channels 1450-1590nm Dual Fiber CWDM Mux Demux SNR-CWDM-MDM-8-1U, LC/UPC. [Електронний ресурс] // ООО «НАГ». – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://shop.nag.ru/catalog/07179.uplotnenie-cwdmdwdm/33756.multipleksorydemultipleksory-muxdmux/14656.snr-cwdm-mdm-8-1u#link-params>
- 13.DATASHEET. FRM220 CWDM Optical Add/Drop Multiplexer. [Електронний ресурс] // CTC Union – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://optokon.ua/files/items/datasheet/FRM220OADM.pdf>
- 14.DATASHEET. 10G CWDM SFP+ 1270nm~1450nm 20km DOM Transceiver. [Електронний ресурс] // FS.COM. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://img-en.fs.com/file/datasheet/cwdm-sfp-plus-1270nm-1450nm-20km-transceiver-datasheet.pdf>
- 15.DATASHEET. S5850-32S2Q Switch. [Електронний ресурс] // FS.COM. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://img-en.fs.com/file/datasheet/s5850-series-switches-datasheet.pdf>